

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**GEORGES MONNOT**

*Première thèse*

## CONTRIBUTION A LA MESURE INSTANTANÉE DES TEMPÉRATURES DES FLAMMES ÉCLAIRANTES

*Deuxième thèse*

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

*soutenues le 13 juin 1952, devant la commission d'examen*

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| MM. RIBAUD ..... | <i>Président.</i>    |
| CABANNES.....    | } <i>Examineurs.</i> |
| BAUER .....      |                      |

PUBLIÉ PAR

LA REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE  
ET ANNALES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES

*Vol. IX, n° 11, p. 587 et n° 12, p. 740 (1954)*

—  
PARIS

1952



Digitized by the Internet Archive  
in 2026

[https://archive.org/details/IA41552216\\_0039](https://archive.org/details/IA41552216_0039)

## THÈSES

PRÉSENTÉES

## FACULTÉ DES SCIENCES

À LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

Nom du Candidat : MONNOT.

Prénoms : GEORGES, ALPHONSE. MONNOT

Date de la soutenance : 13 Juin 1952.

Numéro d'ordre : Série A 2711 — N° 3584.

**MONNOT (Georges).** — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclairantes. — *Paris*, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1954, in-8°, 56 p., fig.

*Th. Sc. Phys., Paris, 1952,*  
*Sér. A. 2711, N° 3584.*

**MONNOT (Georges).** — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclairantes. — *Paris*, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1954, in-8°, 56 p., fig.

*Th. Sc. Phys., Paris, 1952,*  
*Sér. A. 2711, N° 3584.*

**MONNOT (Georges).** — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclairantes. — *Paris*, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1954, in-8°, 56 p., fig.

*Th. Sc. Phys., Paris, 1952,*  
*Sér. A. 2711, N° 3584.*

**MONNOT (Georges).** — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclairantes. — *Paris*, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1954, in-8°, 56 p., fig.

*Th. Sc. Phys., Paris, 1952,*  
*Sér. A. 2711, N° 3584.*

LA REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE  
ET ANNALES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES

Vol. IX, n° 11, p. 587 et n° 12, p. 740 (1954)

PARIS

# FACULTÉ DES SCIENCES

Nom du Candidat : MONNOT.

Prénoms : Georges, ALPHONSE.

Date de la soutenance : 13 juin 1932.

Numéro d'ordre : Série A 2711 — N° 3284.

MONNOT (Georges). — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclatantes. — Paris, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1934, in-8°, 56 p., fig.

Th. Sc. Phys., Paris, 1932.  
Sér. A. 2711, N° 3284.

MONNOT (Georges). — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclatantes. — Paris, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1934, in-8°, 56 p., fig.

Th. Sc. Phys., Paris, 1932.  
Sér. A. 2711, N° 3284.

MONNOT (Georges). — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclatantes. — Paris, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1934, in-8°, 56 p., fig.

Th. Sc. Phys., Paris, 1932.  
Sér. A. 2711, N° 3284.

MONNOT (Georges). — Contribution à la mesure instantanée des températures des flammes éclatantes. — Paris, Revue de l'Institut Français du Pétrole, 1934, in-8°, 56 p., fig.

Th. Sc. Phys., Paris, 1932.  
Sér. A. 2711, N° 3284.

# THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

**GEORGES MONNOT**

*Première thèse*

## CONTRIBUTION A LA MESURE INSTANTANÉE DES TEMPÉRATURES DES FLAMMES ÉCLAIRANTES

*Deuxième thèse*

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

*soutenues le 13 juin 1952, devant la commission d'examen*

|                  |                      |
|------------------|----------------------|
| MM. RIBAUD ..... | <i>Président.</i>    |
| CABANNES....     | } <i>Examineurs.</i> |
| BAUER .....      |                      |

PUBLIÉ PAR

LA REVUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE  
ET ANNALES DES COMBUSTIBLES LIQUIDES

*Vol. IX, n° 11, p. 587 et n° 12, p. 740 (1954)*

—  
PARIS

# FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen..... M. A. CHATELET.

## PROFESSEURS

|                                     |                                                   |                                  |                                             |
|-------------------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------|
| G. JULIA..... T                     | Analyse supérieure et Algèbre supérieure.         | P. DRACH..... T                  | Zoologie.                                   |
| A. DENJOY..... T                    | Théorie des fonctions.                            | KASTLER..... T                   | Physique.                                   |
| L. LUTAUD..... T                    | Géographie physique et Géologie dynamique.        | CHATELET..... T                  | Arithmétique et théorie des nombres.        |
| E. DARMOIS..... T                   | Enseignement de Physique.                         | EPHRUSSI..... T                  | Génétique.                                  |
| Robert LÉVY..... T                  | Physiologie comparée.                             | WURMSER..... T                   | Biologie physico-chimique.                  |
| M <sup>me</sup> RAMART-LUCAS..... T | Chimie organique.                                 | BAUER..... T                     | Chimie-Physique.                            |
| FOCH..... T                         | Mécanique physique et expérimentale.              | RIVIÈRE (P. C. B.)..... T        | Géologie (P. C. B.).                        |
| PAUTHENIER..... T                   | Electrotechnique générale.                        | GAUTHIERET..... T                | Biologie végétale (P. C. B.).               |
| DE BROGLIE..... T                   | Théories physiques.                               | LUCAS..... T                     | Physique.                                   |
| JOB..... T                          | Chimie générale.                                  | A. THOMAS..... T                 | Évolution des êtres organisés.              |
| PRENANT..... T                      | Anatomie et Histologie comparées.                 | ARNULF..... T                    | Optique appliquée.                          |
| COMBES..... T                       | Physiologie végétale.                             | MAX MORAND..... T                | Physique.                                   |
| GARNIER..... T                      | Géométrie supérieure.                             | SOLEILLET..... T                 | Physique.                                   |
| PÉRÈS..... T                        | Mécanique des fluides et applications.            | FORTIER..... T                   | Mécanique expérimentale des fluides.        |
| LAUGIER..... T                      | Physiologie générale.                             | DANJON..... T                    | Astronomie.                                 |
| TOUSSAINT..... T                    | Technique Aéronautique.                           | FROMAGEOT..... T                 | Chimie biologique.                          |
| M. CURIE..... T                     | Physique (P. C. B.).                              | LAPORTE..... T                   | Physique générale et Radioactivité.         |
| G. RIBAUD..... T                    | Hautes températures.                              | JANET..... T                     | Mathématiques générales.                    |
| CHAZY..... T                        | Mécanique analytique et Mécanique céleste.        | PETIT..... T                     | Biologie maritime.                          |
| CHROZE..... T                       | Physique théorique et Physique céleste.           | QUENEY..... T                    | Météorologie et dynamique atmosphérique.    |
| DUPONT..... T                       | Théories chimiques.                               | GALLIEN..... T                   | Biologie animale (P. C. B.).                |
| VALIRON..... T                      | Calcul différentiel et Calcul intégral.           | EICHHORN..... T                  | Biologie végétale (P. C. B.).               |
| BARRABÉ..... T                      | Géologie structurale et Géologie appliquée.       | DE CUGNAC..... T                 | Biologie végétale (P. C. B.).               |
| VAVON..... T                        | Analyse et mesures chimiques.                     | M <sup>lle</sup> CAUCHOIS..... T | Chimie-Physique.                            |
| G. DARMOIS..... T                   | Calcul des probabilités et Physique mathématique. | THELLIER..... T                  | Physique du Globe                           |
| J. BOUCHART..... T                  | Géographie physique et Géologie dynamique.        | AUDUBERT..... T                  | Electrochimie.                              |
| AUBEL..... T                        | Chimie biologique.                                | L'HÉMITIER..... T                | Génétique.                                  |
| M <sup>me</sup> JOLIO-CURIE..... T  | Physique générale et Radioactivité.               | GRIVET..... T                    | Radio-électricité.                          |
| PLANTEFOL..... T                    | Botanique.                                        | PONCIN..... T                    | Mécanique des fluides.                      |
| CARANNES..... T                     | Recherches physiques.                             | THIRY..... T                     | Mécanique appliquée.                        |
| GRASSÉ..... T                       | Evolution des êtres organisés.                    | DUBREIL..... T                   | Mathématiques générales                     |
| PRÉVOST..... T                      | Chimie organique.                                 | QUELET..... T                    | Chimie (P. C. B.).                          |
| BOULIGAND..... T                    | Application de l'analyse à la géométrie.          | CAGNIARD..... T                  | Géophysique appliquée                       |
| CHAUDRON..... T                     | Chimie appliquée.                                 | CHAMPETIER..... T                | Chimie appliquée.                           |
| WYART..... T                        | Minéralogie.                                      | CUVILLIER..... T                 | Géologie structurale et Géologie appliquée. |
| TEISSIER..... T                     | Zoologie.                                         | JUNG..... T                      | Pétrographie.                               |
| MANGENOT..... T                     | Biologie végétale.                                | TRILLAT..... T                   | Physique (P. C. B.).                        |
| P. AUGER..... T                     | Physique quantique et relativité.                 | WIEMANN..... T                   | Chimie (P. C. B.).                          |
| MONNIER..... T                      | Physiologie générale.                             | JACQUINOT..... T                 | Physique (P. C. B.).                        |
| PIVETEAU..... T                     | Géologie.                                         | VASSY..... T                     | Physique de l'atmosph.                      |
| ROCARD..... T                       | Physique.                                         | DESTOUCHES..... T                | Théories physiques.                         |
| H. CARTAN..... T                    | Mathématiques (E. N. Supérieure).                 | M. PRUVOST..... T                | Géologie.                                   |
| SCHAEFFER..... T                    | Physiologie des fonctions.                        | AMIEL..... T                     | Chimie (P. C. B.).                          |
| LAFFITTE..... T                     | Chimie générale.                                  | HOCART..... T                    | Minéralogie.                                |
| FAVARD..... T                       | Mécanique générale.                               | MACHEROEUF..... T                | Microbiologie.                              |
| COULOMB..... T                      | Physique du Globe.                                | J.-P. MATHIEU..... T             | Physique (P. C. B.).                        |
| M <sup>lle</sup> COUSIN..... T      | Biologie animale (P. C. B.).                      | COUTEAUX..... T                  | Biologie animale (P. C. B.).                |
| CHRÉTIEN..... T                     | Chimie minérale.                                  | MAY..... T                       | Biologie animale (P. C. B.).                |
|                                     |                                                   | CHOQUET..... T                   | Calcul différentiel.                        |
|                                     |                                                   | FELDMANN..... T                  | Biologie (P. C. B.).                        |
|                                     |                                                   | GUINIER..... T                   | Physique (P. C. B.).                        |
|                                     |                                                   | JOST..... T                      | Biologie (P. C. B.).                        |

Secrétaire..... CH. MONIER.



## Introduction.

La mesure de la température des flammes constitue certainement un chapitre attrayant de la Physique si l'on en juge par le nombre impressionnant de travaux relatifs à cette question. Aussi peut-il paraître quelque peu téméraire de chercher encore des perfectionnements nouveaux dans ce domaine. L'excuse du physicien, et plus encore de l'ingénieur, est l'importance des combustions qui constituent la source d'énergie essentielle du monde moderne.

Le présent travail a été poursuivi à la STATION NATIONALE DE RECHERCHES « CLAUDE BONNIER », qui, à l'intérieur de l'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE, a pour rôle l'étude de l'utilisation rationnelle des produits pétroliers. A l'origine, la question que s'était proposée l'auteur était la détermination du coefficient d'échange thermique entre les gaz et les parois d'un moteur. Le mécanisme du passage de la chaleur des gaz à la paroi de la chambre de combustion est complexe et la conduction, la convection et le rayonnement y jouent chacun un rôle. Pour connaître l'effet global, il fallait donc mesurer la température superficielle de la paroi, le flux de chaleur qu'elle recevait et la température des gaz à son voisinage. Ces grandeurs sont essentiellement variables dans un moteur.

Notre premier objectif a été la mesure des températures de surface. Un travail antérieur de PFRIEM (25) proposait une solution élégante que nous nous sommes efforcés de mettre en œuvre. Une ouverture étant pratiquée dans la paroi d'une culasse de moteur, on y place un bouchon d'aluminium rappelant un peu la forme d'une bougie d'allumage. Ce bouchon est traversé suivant son axe par une électrode également en aluminium. Ces deux pièces sont isolées électriquement au moyen d'une oxydation anodique soignée. A l'extrémité du bouchon qui se présente à l'intérieur de la chambre de combustion, on fait réapparaître l'aluminium en enlevant au tour la couche protectrice d'alumine au milieu

de l'électrode centrale et sur la périphérie du corps de la pièce. Il ne reste plus qu'à réunir électriquement les deux plages conductrices ainsi constituées par une mince couche métallique pour laquelle PFRIEM a proposé, à juste titre, l'utilisation de l'or. Cette couche mince, d'une épaisseur de quelques dixièmes de micron, est obtenue commodément par projection cathodique ou évaporation thermique. Elle doit matérialiser la couche superficielle et en donner la température au moyen de la mesure de sa résistance électrique. Un montage en pont de Wheatstone alimenté en courant alternatif avec un tube cathodique comme appareil sensible devrait permettre l'enregistrement des variations de la température superficielle au cours du cycle.

Les couches métalliques minces sont généralement utilisées pour leurs propriétés optiques. FÉRY (12) cependant, en 1933, a étudié systématiquement la résistivité des couches minces de platine. Toutefois, le platine adhérait mal sur l'alumine, nous avons dû utiliser l'or déposé par projection cathodique ou par évaporation thermique. L'adhérence de cette couche sur l'alumine était satisfaisante, mais nous n'avons pas réussi à vieillir convenablement le métal déposé pour amener sa résistivité à être stable. Les variations de résistivité observées d'une expérience à l'autre interdisaient tout étalonnage sérieux. Ces variations ont été attribuées à la structure lacunaire de ces films métalliques fins (6). COLOMBANI et RANC (8) ont montré qu'il faut pour l'or atteindre une certaine épaisseur, d'ailleurs variable en fonction du support, pour retrouver une résistivité métallique stable. Il faudrait donc, pour reprendre fructueusement cette étude, accepter d'utiliser des dépôts plus épais que ceux mis en œuvre dans nos premières expériences.

Cet insuccès nous avait amenés à abandonner momentanément cette étude pour attaquer l'autre aspect du problème : celui de la tempé-

rature des gaz. Pendant la combustion, les gaz qui évoluent dans la chambre d'un moteur à combustion interne sont portés à haute température et sont lumineux. Toutefois, selon qu'il s'agit d'un moteur à allumage commandé ou d'un moteur Diesel, l'émission des gaz est toute différente. Dans le premier cas, on observe essentiellement un ensemble de raies et de bandes tandis que la flamme du Diesel émet essentiellement un fond continu auquel se superposent quelques bandes, visibles presque uniquement dans la partie ultraviolette du spectre.

Dans tous les cas, les mesures sur moteur exigent un procédé permettant de suivre l'évolution rapide et périodique du phénomène. Pour le moteur à allumage commandé, on peut songer à utiliser la méthode de renversement des raies. On sait, depuis les travaux de BAUER (3), que les raies jaunes du sodium ou les raies rouges du lithium ou du potassium correspondent à une émission purement thermique. Dans une région de la flamme de température uniforme, ces différentes raies conduisent à des résultats identiques. Aussi certains auteurs ont-ils utilisé la méthode de FÉRY, soit au moyen d'un dispositif d'exploration stroboscopique du cycle (10), soit au moyen d'une cellule photo-électrique (39) (16) susceptible de suivre les fluctuations du phénomène au cours du cycle. Toutefois, un travail récent de GAYDON et WOLFARD (14) montre, en ce qui concerne les hydrocarbures, que dans les flammes de mélange préalable l'utilisation de la méthode de Féry exige quelques précautions. Ces auteurs ont en effet observé dans la zone de réaction, pour divers métaux (fer, plomb, sodium et thallium) utilisés comme colorants, certaines lignes qui correspondent à une excitation électronique anormalement élevée (173 kcal/mol pour certaines lignes du fer). Il faut noter que ces observations sont faites sur des flammes stationnaires et dans la zone du cône bleu. Par ailleurs, il n'est fait mention que des émissions dans la partie ultraviolette du spectre. Les raies utilisables dans la partie rouge ou proche infrarouge du spectre montrent au contraire un accord satisfaisant avec les températures théoriques de combustion. Par bonheur, les expérimentateurs travaillant sur moteur ont utilisé presque exclusivement le doublet du sodium dans le jaune, du potassium ou du lithium dans le rouge de sorte que les valeurs données dans la littérature ne sont pas entachées d'erreurs systématiques.

La mesure des températures dans les flammes éclairantes s'effectue de façon relativement aisée. Dès que l'intensité lumineuse du fond continu émis par la flamme devient appréciable, la

méthode de Kurlbaum est d'un emploi commode et tout à fait classique (27). Par ailleurs, BARRET (2) a pu montrer sur une flamme d'acétylène que la méthode de Féry et la méthode de Kurlbaum conduisent à des valeurs identiques de la température, aux faibles erreurs d'expérience près.

Nos premiers travaux ont été effectués sur un moteur Diesel dans la chambre de combustion duquel se développe une flamme de diffusion très lumineuse. Faute toutefois de disposer de deux regards se faisant face dans la chambre de combustion, nous n'avons pas pu utiliser la méthode de Kurlbaum. Toutefois, ne pouvant mesurer la température vraie de la flamme, nous avons utilisé la partie visible du spectre émis pour mesurer la température de couleur de cette flamme au moyen d'un pyromètre à deux couleurs et à cellules photo-électriques. Ces mesures nous ont amené à conclure qu'il existe dans la charge gazeuse du moteur Diesel un fort gradient de température dans les conditions normales de fonctionnement de ce moteur. Il en résulte que les températures mesurées ne sont généralement pas celles des gaz au voisinage même de la paroi et, ici non plus, nous n'atteignons pas directement l'un des termes permettant le calcul du coefficient d'échange entre gaz et paroi.

Le programme des travaux de la STATION NATIONALE DE RECHERCHES CLAUDE BONNIER nous a ensuite dirigé vers la mesure des températures de flammes industrielles à grand développement et à forte turbulence pour laquelle nous avons construit un pyromètre à cellule monochromatique sous deux versions : l'une permet la mesure des températures de brillance en divers points de la flamme, l'autre permet la mesure de la température vraie et des facteurs d'émission locaux par application de la méthode de Kurlbaum.

Dans l'exposé qui suit, nous avons toutefois, après un bref rappel des données théoriques de base concernant l'émission des flammes considérées, préféré décrire tout d'abord le pyromètre monochromatique de construction plus simple et dont l'étude explique certaines particularités du fonctionnement du pyromètre à deux couleurs.

Le présent travail a été poursuivi sous la bienveillante direction de M. le professeur RIBAUD auquel j'exprime ici ma profonde gratitude.

L'Institut du Pétrole m'a fourni les moyens matériels nécessaires à cette étude ; je remercie de ce soutien son directeur général actuel, M. NAVARRE, et son prédécesseur M. JACQUÉ,

ainsi que le directeur de la Station Nationale de Recherches Claude Bonnier, M. THALER.

Je remercie bien vivement M. VICHNIEVSKY, sous-directeur de la Station Claude Bonnier, de l'aide amicale et des conseils éclairés qu'il m'a sans cesse apportés. Je remercie également tous mes collègues de la Station pour leur aide effi-

cace et en particulier MM. FENAU et PIERRE qui ont construit les divers pyromètres.

J'exprime aussi tous mes remerciements à M. MICHAUD et à mes autres collègues du Comité d'études du rayonnement des flammes et du laboratoire des Hautes Températures pour leur aide lors des mesures sur le four expérimental.

## Émission des flammes de diffusion.

Les flammes sont ordinairement classées en deux catégories : flammes de mélange préalable et flammes de diffusion. Dans les premières, nous avons vu que la rapidité de la réaction ne permet pas toujours à l'équilibre thermodynamique de s'établir ; nous devons à GAYDON (15) d'avoir montré, par l'étude spectroscopique de telles flammes brûlant à basse pression, que la température de rotation de certains radicaux pouvait atteindre 8.000° et 10.000° C pour une flamme dont la température d'équilibre est de 2.300° C.

L'étude spectroscopique des flammes de diffusion montre, qu'au contraire, l'équilibre thermodynamique est atteint, la réaction ayant lieu beaucoup moins rapidement.

Les flammes de diffusion d'hydrocarbures sont chargées de particules de carbone qu'elles contiennent en suspension. Il est généralement admis que ces particules sont, quelle que soit la nature du combustible, de dimensions relativement uniformes et de diamètre moyen égal à 0,3  $\mu$ . Cette opinion est basée sur le résultat de travaux relativement anciens, tels que ceux d'ANGSTRÖM, STARK ou BECKER et portent sur de petites flammes de laboratoire. L'apparition du microscope électronique a fourni aux physiciens un instrument puissant permettant de poursuivre commodément les mesures plus avant dans le domaine des petites dimensions. Des expériences récentes (9) faites sur un four expérimental alimenté au fuel lourd ont montré que, du moins dans une flamme industrielle de grandes dimensions et présentant un régime hydrodynamique fortement turbulent, les particules contenues dans la flamme sont loin de présenter l'uniformité de dimensions jusqu'ici admise. Certaines particules peu nombreuses et constituant peut-être des résidus de cracking plus ou moins

cokéfiés atteignent des dimensions relativement considérables de l'ordre de plusieurs dizaines de microns. On rencontre par ailleurs des particules très nombreuses de dimensions beaucoup plus petites, allant de quelques dixièmes à quelques centièmes de micron, la dimension la plus fréquente paraissant être de l'ordre de 0,03 à 0,04  $\mu$ . Il est probable que la combustion de ces deux catégories de particules doit se faire selon des modes différents. L'examen spectroscopique des différentes portions de la flamme apportera sans doute sur ce point les renseignements les plus intéressants.

Le présent travail traite de la mesure de la température dans de telles flammes. Cette mesure est basée sur l'existence, dans leur spectre d'émission, d'un fond continu dû à la présence des particules de carbone portées à haute température pendant la combustion. Toute méthode se rapportant à l'existence de ce fond continu suppose donc, implicitement ou explicitement, l'égalité de température entre les particules solides et le gaz qui les baignent. Cette égalité n'est nullement évidente puisque les particules rayonnent beaucoup plus que les gaz environnants.

SCHACK (30) est sans doute l'un des premiers à avoir cherché par le calcul à évaluer la différence de température existant entre les particules solides contenues dans une flamme éclairante et les gaz de cette flamme. Il en a conclu que cette différence est toujours faible, de l'ordre du degré.

En raison de l'importance de cette conclusion, rappelons brièvement ici l'essentiel de son raisonnement.

Soit :

$T_c$ , °K : température des particules de carbone  
 $F$ ,  $m^2$  : surface d'une particule de carbone

$\alpha$  en  $\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}}$  : coefficient d'échange de chaleur  
entre gaz et particules  
 $T_g^\circ\text{K}$  : température du gaz.  
 $T_o^\circ\text{K}$  : température de l'ambiance.

Le rayonnement des particules de suie, qui ne suit pas la loi de Stephan-Boltzmann, est une fonction  $S(T_c)$  de la température ; il est aussi proportionnel à la surface, soit :

$$F \cdot S(T_c) \text{ Kcal/h.}$$

A l'équilibre, on a :

$$F \cdot S(T_c) = F \cdot \alpha (T_g - T_c) \quad [1]$$

$$\text{donc} \quad T_g - T_c = \frac{S(T_c)}{\alpha} \quad [2]$$

Le coefficient d'échange  $\alpha$  dépend de la grosseur des particules ; d'après des expériences de KENNELLY, WRIGHT et BYLEVELT (19) sur des fils de diamètre inférieur à 0,1 mm,  $\alpha$  est sensiblement inversement proportionnel au diamètre.

$$dE = J_{o,\lambda} \cdot F \left( 1 - \frac{2}{k^2 d^2} + \frac{2}{k d} e^{-kd} + \frac{2}{k^2 d^2} e^{-kd} \right) d\lambda \text{ kcal/h} \quad [6]$$

La connaissance du diamètre est donc importante. ANGSTRÖM (1) a mesuré directement le diamètre des particules de suie de stéarine et l'a trouvé égal à 0,3  $\mu$ . STARK en 1897 a obtenu des dimensions de 0,26  $\mu$  tout à fait comparables.

Travaillant sur une suie formée à partir d'acétate d'amyle, BECKER (5) a indiqué que sous une épaisseur de 0,0126 mm et pour une longueur d'onde de 0,629  $\mu$ , elle absorbait 97,26 % de la lumière incidente.

De la formule :

$$J = J_o e^{-ks} \quad [3]$$

où  $J_o$  est l'intensité incidente,  $J$  l'intensité transmise et  $s$  l'épaisseur du milieu absorbant, BECKER tire pour le coefficient  $k$  la valeur :

$$k = 2,826 \text{ cm}^{-1} \quad [4]$$

Pour les couches les plus minces de suie qu'il ait observées, BECKER a mesuré pour la même longueur d'onde une absorption de 23,4 %, ce qui correspond à une épaisseur de 0,92  $\mu$ . Ceci ne correspond pas nécessairement à une couche uniforme de particules serrées les unes contre les autres et STARK a fait remarquer qu'il pouvait y avoir des vides entre particules amoncelées.

Il en résulte que SCHACK estime ne pas faire une grosse erreur en conservant la valeur de 0,3  $\mu$  pour dimension des particules contenues dans la flamme.

A partir des mesures de KENNELLY, WRIGHT et BYLEVELT citées plus haut sur des fils de diamètre égal à 0,1 mm pour lesquels le coefficient d'échange de chaleur était d'environ 100 kcal/m<sup>2</sup>h °C et admettant que ce coefficient est à peu près inversement proportionnel au diamètre, SCHACK calcule que pour les particules de 0,3  $\mu$  de diamètre, on a :

$$\alpha = \frac{100 \times 0,1}{0,0003} = 33\,000 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C} \quad [5]$$

Il lui faut alors calculer le rayonnement de chaque particule, rayonnement qui engendre son refroidissement compensé à son tour par les échanges thermiques avec les gaz environnants. SCHACK a établi dans un autre article (29) que le rayonnement monochromatique de longueur d'onde  $\lambda$  émis par une sphère absorbante de diamètre  $d$  est donné par :

où

$J_{o,\lambda}$  est le rayonnement du corps noir, d'après la loi de Plank, à la température  $T_c$  et pour l'intervalle  $d\lambda$ ,

$k$  : le facteur d'absorption pour la longueur d'onde  $\lambda$ , exprimé en m<sup>-1</sup>,

$F$  : la surface de la sphère exprimée en m<sup>2</sup>.

Par ailleurs, dans l'infrarouge,  $k$  prend la valeur :

$$k = \frac{k_o}{\lambda^{0,9}} \quad [7]$$

où  $k_o$  est une constante.

Pour le calcul de  $k$ , la formule [4] n'est pas immédiatement utilisable puisqu'il y a des espaces vides entre les sphères absorbantes. Tenant compte de ces vides, SCHACK se donne :

$$k = 1,0 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

pour la longueur d'onde de 0,629  $\mu$ . La formule [7] lui fournit alors  $k_o = 5,7 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$ . Dans ces conditions, le facteur  $k$  d'absorption pour la suie compacte est :

$$k = \frac{570\,000}{\lambda^{0,9}} \text{ m}^{-1} \quad [8]$$

Tenant compte de :

$$J_{0,\lambda} = 3,17 \cdot 10^{-8} \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{1,43}{\lambda T}} - 1} \text{ kcal/m}^2 \text{ h cm}$$

il reporte ces valeurs dans la formule [6] qui devient en intégrant :

$$S(T_c) =$$

$$3,17 \cdot 10^{-8} \int_0^\infty \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{1,43}{\lambda T}} - 1} \left\{ 1 - \frac{2}{\left(\frac{0,17}{\lambda^{0,9}}\right)^2} + \frac{2}{\frac{0,17}{\lambda^{0,9}}} e^{-\frac{0,17}{\lambda^{0,9}}} + \frac{2}{\left(\frac{0,17}{\lambda^{0,9}}\right)^2} e^{-\frac{0,17}{\lambda^{0,9}}} \right\} d\lambda \text{ en kcal/h m}^2 \quad [9]$$

Cette formule n'est intégrable que graphiquement. SCHACK le fait pour une température de 1600°C soit 1873°K qui est fréquemment observée dans les flammes des foyers industriels. Il obtient :

$$S(1873) = 33\,000 \text{ kcal/m}^2 \text{ h} \quad [10]$$

En tenant compte de la valeur du coefficient d'échange thermique donné par la formule [5] et de la valeur de l'énergie ainsi rayonnée, SCHACK déduit que la différence de température entre la particule et les gaz environnants est de

$$T_g - T_c = \frac{33\,000}{33\,000} = 1^\circ \text{C} \quad [11]$$

### *Calcul simplifié faisant appel à la conduction thermique du gaz.*

Le rappel précédent du raisonnement de SCHACK montre la difficulté des calculs auxquels il s'est livré sans peut-être s'assurer cependant d'une base indiscutable. La variation proposée du facteur d'absorption  $k$  en fonction de la longueur d'onde n'est sans doute valable que dans un domaine limité. Nous verrons au chapitre III que HOTTEL et BROUGHTON ont repris cette question et que, selon ces auteurs, l'exposant de  $\lambda$  dans la formule [9] varie selon la longueur d'onde considérée.

Par ailleurs, le calcul du coefficient d'échanges thermiques qui est basé sur des expériences d'échanges entre gaz et fils fins revient en fait à retrouver que le nombre de BIOT  $\frac{\alpha d}{\lambda}$  (où  $d$  est le diamètre du fil et  $\lambda$  la conductibilité thermique du gaz) est constant dès l'instant que le diamètre est assez faible (28). C'est dire que, pour

des particules d'aussi petites dimensions que celles qui s'observent dans les flammes, les échanges thermiques avec les gaz qui les baignent ne se font que par conduction.

Remarquons aussi que, dans une flamme éclairante industrielle telle que celles obtenues par pulvérisation de combustible liquide dans un

four, certaines particules de suie ont une durée de vie relativement très longue. C'est ainsi que, dans le four expérimental d'IJmuiden, pour une flamme de 5 à 6 m de long et une vitesse moyenne d'écoulement de l'ordre de 50 à 60 m/s certaines particules émissives ne doivent brûler et disparaître qu'au bout de 0,1 s. environ. L'hypothèse proposée consiste à supposer que les particules circulent entourées d'une couche de gaz inertes quasi immobile vis-à-vis d'elles. Lorsque, progressant par diffusion dans cette couche, l'oxygène parvient jusqu'à la particule solide, la combustion qui s'amorce aussitôt en raison de la température élevée du système doit désorganiser la couche protectrice d'inertes et la disparition par combustion de la particule doit en résulter aussitôt.

Nous avons dit que les expériences d'IJmuiden ont montré que les particules recueillies dans la flamme sont le plus souvent de très petite dimension, de l'ordre de 0,03 à 0,04  $\mu$ . T. M. SUGDEN et B. A. THRUSH (31) indiquent également 0,04  $\mu$  pour valeur moyenne du diamètre des particules de carbone présentes dans une flamme de diffusion d'acétylène.

A IJmuiden, on a observé une diminution rapide du nombre de ces particules au fur et à mesure que les prélèvements sont faits plus loin du brûleur, mais par contre leur diamètre moyen ne varie pas sensiblement d'une section à l'autre de la flamme. Leur combustion pourrait donc être expliquée par notre hypothèse. Inversement, les grosses particules recueillies, relativement très rares vis-à-vis des précédentes, semblent présenter des dimensions décroissantes au fur et à mesure que les prélèvements sont faits plus loin du brûleur. Leur combustion ne serait donc pas quasi instantanée, mais au contraire progressive pendant leur parcours dans le four.

Outre leurs dimensions, la forme souvent compliquée de ces grosses particules permet d'imaginer une telle différence entre leur mode de combustion et celui de la combustion des plus petites particules.

Soit alors une particule de suie sphérique de rayon  $r$  portée à la température  $T_1$ . Elle est environnée de gaz à température moyenne  $T_0$  ayant une conductibilité calorifique  $\lambda$ . Par suite du rayonnement de la particule,  $T_1$  est inférieur à  $T_0$ . L'apport par conductibilité donne alors naissance au flux

$$\Phi = 4\pi\lambda r(T_0 - T_1) \quad [12]$$

Le rayonnement, en régime établi, enlève une quantité égale de chaleur à la particule :

$$\Phi = 4\pi r^2 \varepsilon \sigma T_1^4 \quad [13]$$

où  $\varepsilon$  est le pouvoir émissif total de la suie constituant la sphère. Il en résulte que la différence de température est donnée par :

$$T_0 - T_1 = \frac{\varepsilon \sigma T_1^4}{\lambda} r \quad [14]$$

Nous obtiendrons une limite supérieure de  $T_0 - T_1$  en supposant  $\varepsilon = 1$  pour la suie.

Évaluons les autres termes de la formule [14] :

—  $\sigma = 5,75 \cdot 10^{-12}$  watt/cm<sup>2</sup> °K est une constante universelle.

— Soit  $T_1 = 1873$  °K (1600 °C), valeur adoptée par SCHACK.

— Soit  $r = 0,3 \mu$ , valeur adoptée par SCHACK d'après les travaux d'ANGSTRÖM.

— Pour  $\lambda$ , il s'agit vraisemblablement de la conductibilité de l'azote ou, peut-être, de l'oxyde de carbone. En présence d'oxygène ou même de gaz carbonique, il y aurait en effet combustion à la température considérée. Pour l'azote, la conductibilité à 0°C est de  $5,5 \cdot 10^{-5}$  cal/cm.s °C. Compte tenu de sa variation proportionnelle à  $\sqrt{T}$ , cette valeur devient à 1873° K.

$$\lambda_{1873} = 60,2 \cdot 10^{-5} \text{ watt/cm } ^\circ\text{C}.$$

En reportant ces différentes valeurs dans la formule [14], nous obtenons :

$$T_0 - T_1 = 1,75 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Cette valeur est tout à fait comparable à celle obtenue par SCHACK.

Si, comme semblent le montrer les expériences d'IJmuiden, les particules ont un diamètre beaucoup plus petit, la formule [14] montre que dans ce cas la différence de température entre gaz et

particules est également plus petite et peut devenir inférieure à 1° C.

Le même raisonnement permet de trouver aisément à quelle distance le refroidissement engendré par le rayonnement d'une particule s'étend dans les gaz ambiants.

Fixons-nous la valeur de la différence de température que nous voulons repérer dans les gaz, soit par exemple  $\Delta T = 0,1^\circ$ . Cette différence de température s'observe sur une sphère concentrique à la particule et à une distance  $R$  de son centre. Avec les mêmes notations que ci-dessus, nous aurons :

$$\frac{1}{R} = \frac{4\pi\lambda}{\Phi} \Delta T \quad [15]$$

ou, sous une autre forme :

$$R = \frac{r^2 \sigma T^4}{\lambda \cdot \Delta T} \quad [16]$$

En reprenant l'exemple d'une particule de  $0,3 \mu$  de diamètre portée à 1600 °C on obtient pour  $\Delta T = 0,1$  °C.

$$R_{0,1} = 0,7 \mu.$$

Cette faible valeur du rayon de la zone perturbée vient à l'appui de l'hypothèse de la transmission de la chaleur vers la particule à travers une couche gazeuse immobile. La formule [16] montre de plus que les dimensions de la zone perturbée sont proportionnelles au carré du rayon de la particule. Il en résulte que les très petites particules observées à IJmuiden n'apportent qu'une variation de température tout à fait négligeable au milieu des gaz qui les portent. Il n'en est par contre pas de même pour les grosses particules contenues dans la flamme : peu nombreuses, elles paraissent toutefois ne jouer qu'un rôle secondaire dans le rayonnement global.

Il convient encore de remarquer que les particules ne rayonnent pas uniquement dans un milieu dont la température est négligeable vis-à-vis de leur propre température. Dans une flamme épaisse, elles baignent en particulier dans le rayonnement émis par les autres particules.

Par ailleurs, les gaz constituant la flamme sont également doués d'un certain pouvoir émissif variable avec leur teneur en gaz carbonique et en vapeur d'eau.

Il en résulte que l'équation [13] devrait s'écrire en toute rigueur :

$$\Phi = \int \int (\varepsilon \sigma T_1^4 - E) ds \quad [13']$$

où  $ds$  est l'élément de surface considéré sur la particule, élément recevant de l'ambiance un éclairage énergétique  $E$ . L'intégrale considérée doit être étendue à toute la surface de la particule.

L'équation [13] fournit pour  $\Phi$  une valeur

inférieure à celle retenue dans le raisonnement précédent. Par conséquent, les écarts de température calculés constituent une limite supérieure, ce qui confirme encore mieux la conclusion de SCHACK.

## Le pyromètre monochromatique à cellule.

En participant aux travaux du COMITÉ INTERNATIONAL D'ÉTUDES DU RAYONNEMENT DES FLAMMES, nous avons eu à chercher une solution à la mesure de la température de brillance d'une flamme industrielle. Tout le long d'une telle flamme, de fortes fluctuations de température apparaissent, elles rendent nécessaires l'utilisation d'un appareil aussi dépourvu que possible d'inertie et susceptible de suivre les fluctuations de température les plus rapides. La cellule photo-électrique offre une solution à ce problème. Pour rendre encore plus aisée l'inscription du signal sur l'écran d'un tube cathodique, nous avons choisi comme détecteur la cellule à

plément aux informations données par les pyromètres optiques ordinaires.

### A. Construction et étalonnage de l'appareil.

#### Description de l'appareil.

Le pyromètre monochromatique à cellule, que nous avons construit, comporte essentiellement un système d'écrans concentriques successifs qui déterminent un angle solide de visée de  $4^{\circ}48'$ . Cet angle est assez petit pour que la visée du pyromètre ne couvre qu'un domaine

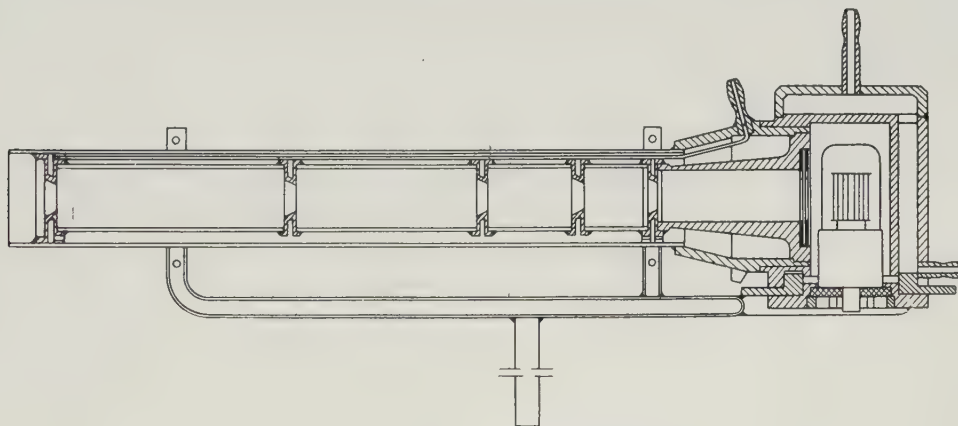


FIG. 2, I. — Schéma du pyromètre à cellule photo-électrique.

multiplication d'électrons qui permet l'attaque directe des plaques du tube cathodique sans passer par des amplificateurs intermédiaires. Sur ce principe, nous avons donc construit un pyromètre monochromatique à cellule susceptible de fournir sur les flammes industrielles un com-

limité de la flamme. Il est suffisant toutefois pour que la cellule fournisse un signal qui ne nécessite pas d'amplification. L'ensemble des écrans, en laiton noir, est refroidi par une circulation d'eau. Une cellule multiplicateur d'électrons reçoit le rayonnement émis dans cet angle

par la flamme sur laquelle le pyromètre est pointé (voir fig. 2, 1). En avant de la cellule, on place un filtre coloré constitué, lors des expériences décrites ci-dessous, par un filtre d'Iéna rouge RG 2, de 2 mm d'épaisseur. Le tableau suivant donne les caractéristiques de transmission de ce filtre reproduites sur la courbe de la fig. 2,2.

*Transmission du filtre RG 2 sur le pyromètre à cellule photo-électrique.*

|                                     |       |       |       |       |       |        |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Longueur d'onde, en $\mu$ . . . . . | 0,700 | 0,644 | 0,640 | 0,630 | 0,620 | 0,615  |
| Coefficient de transmission ...     | 0,980 | 0,846 | 0,608 | 0,073 | 0,001 | 0,0001 |

La cellule photo-électrique utilisée est une cellule Philips multiplicateur d'électrons identique aux cellules RCA 931 A. La courbe de la

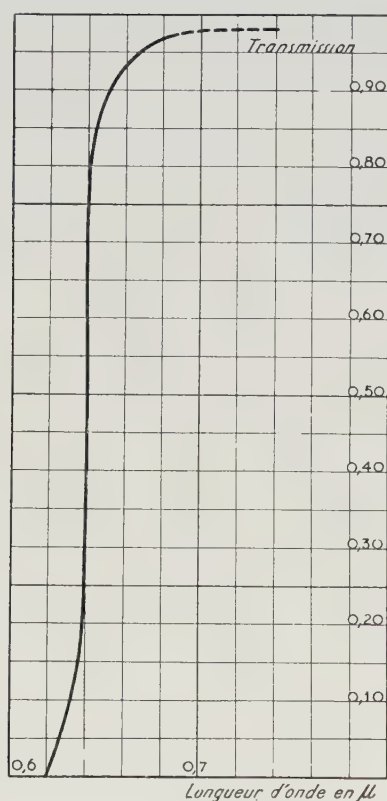


FIG. 2,2. — Courbe de transmission du filtre RG2 de 2 mm d'épaisseur.

fig. 2,3 représente la sensibilité de cette cellule en fonction de la longueur d'onde. Cette cellule reçoit la totalité du flux lumineux transmis par

l'écran et le filtre. Elle est enfermée dans un boîtier refroidi par une circulation d'eau. Dans nos premières expériences, le multiplicateur a été alimenté par une batterie de 10 piles américaines de 100 volts chacune.

La fig. 2,4 représente schématiquement le multiplicateur d'électrons et son alimentation. On voit qu'une résistance de 1 M $\Omega$  est mise en série

avec chacune des dinodes. Par contre l'anode est reliée au pôle positif de la batterie de piles à travers deux résistances en parallèle : d'une part une résistance de 4 M $\Omega$  fixée sur la batterie de piles, d'autre part, la résistance d'entrée

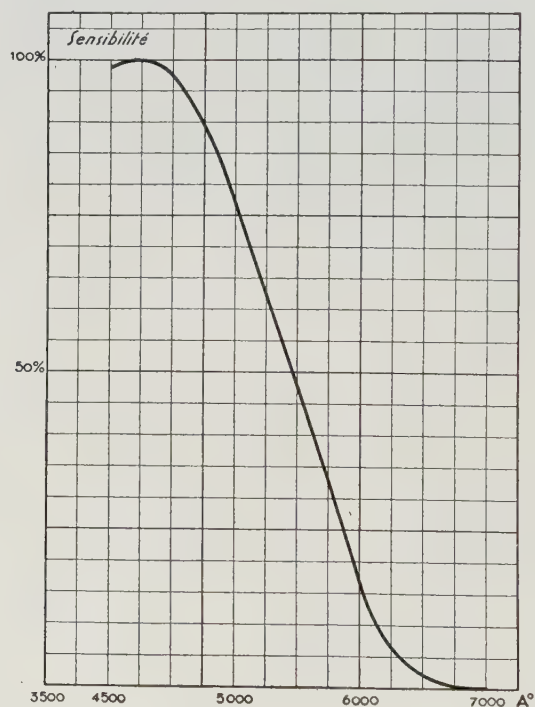


FIG. 2,3. — Sensibilité de la cellule 931 A.

d'un commutateur électronique Philips (type GM 4580) légèrement modifié. Selon que la borne 1 ou la borne 2 est utilisée, cette résistance d'entrée est de 2 ou de 1 M $\Omega$ . Finalement, l'anode débite donc sur une résistance équiva-

lente de  $1,33 \text{ M}\Omega$  ou de  $0,8 \text{ M}\Omega$  auxquelles correspondent deux sensibilités différentes du pyromètre. Le débit de la cellule est d'autant plus grand que la résistance de charge de l'anode est plus faible. Pratiquement, l'appareil branché sur la borne 1 permet d'explorer les tempéra-

tionner sur le réseau électrique. Ils sont toutefois sensibles dans une certaine mesure aux variations de tension. En particulier, la haute tension anodique du tube cathodique dont dépend la sensibilité de ce dernier n'est pas stabilisée.

Au cours de toutes nos expériences nous avons

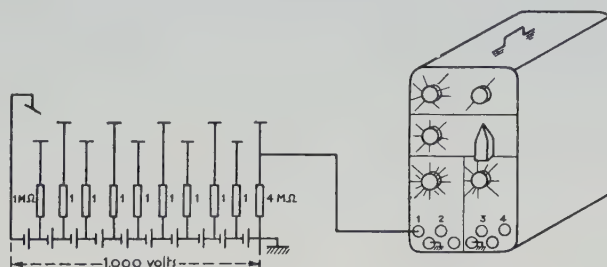


FIG. 2,4. — Schéma de l'alimentation de multiplicateur d'électrons et son branchement au commutateur électrique.

tures entre  $1100$  et  $1600^\circ \text{C}$  tandis que, branché sur la borne 2, il ne permet de couvrir que la gamme de  $1100$  à  $1400^\circ \text{C}$  avec, par contre, une précision plus grande que dans le cas précédent.

Grâce au commutateur électronique, deux spots apparaissent sur le tube de l'oscillographe cathodique. Ces deux spots balayent le tube d'un mouvement horizontal identique sous l'action de la base de temps de l'oscillographe. L'un des spots se déplace verticalement en suivant les signaux issus de la cellule. En l'absence de tout signal sur la seconde voie du commutateur électronique, le spot correspondant trace une ligne horizontale sur l'écran du tube cathodique. Dans les mesures de température, la trace du second spot sert de référence.

En effet, le pyromètre ne recevant aucun rayonnement, on fait coïncider les deux spots. Lorsque le pyromètre est ensuite pointé sur le corps incandescent dont on cherche à déterminer la température de brillance, les deux spots s'écartent l'un de l'autre et la mesure de cet écart fournit la température de brillance si l'appareil a été étalonné au préalable sur un corps noir.

Le second spot peut aussi servir de repère de temps. Pour cela il suffit de le moduler à une fréquence connue. Le balayage étant identique pour les deux spots, la sinusoïde à fréquence connue du second spot permet la mesure du temps pour le phénomène relevé sur le premier spot.

L'utilisation d'appareils électroniques : oscillographe et commutateur, exige quelques précautions. Ces appareils sont prévus pour fonc-

donc alimenté tous les appareils à travers un régulateur de tension alternative du type à fuites magnétiques et à résonance. A la sortie de ce régulateur, la sinusoïde de la tension du secteur est déformée, mais la courbe obtenue est stable dans le temps. Les variations d'amplitude observées ne sont égales qu'à environ 5 % des variations d'amplitude du réseau. Alimenté à travers un tel régulateur, l'appareillage électronique s'est révélé parfaitement stable. Notons

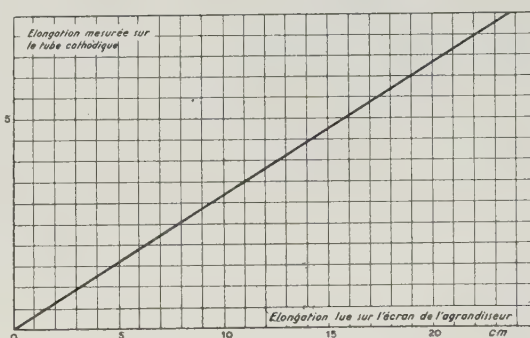


FIG. 2,5. — Correspondance entre les images obtenues sur le tube cathodique et leur reproduction, après photographie sur l'écran de l'agrandisseur (objectif de grossissement 10).

Rapport constant et égal à 3,15.

cependant qu'il convient, avant toute mesure, de laisser les appareils branchés pendant une demi-heure environ pour que les différentes parties du montage prennent leur température de régime.

Pour la commodité de l'étude, les figures qui

apparaissent sur le tube cathodique sont photographiées sur film de 35 mm au moyen d'un appareil fournissant un rapport constant entre les dimensions des figures et leurs images. Un appareil à lecture de microfilm permet ensuite d'examiner ces films à loisir. La courbe expérimentale de la fig. 2,5 montre qu'entre l'image

évidente la nécessité absolue de procéder à l'étalonnage de l'appareil au moment même de son utilisation. Par contre, au cours d'un même étalonnage, nous avons vérifié la parfaite fidélité de l'appareil.

Avec le montage électrique décrit ci-dessus, l'appareil ne peut être utilisé correctement que

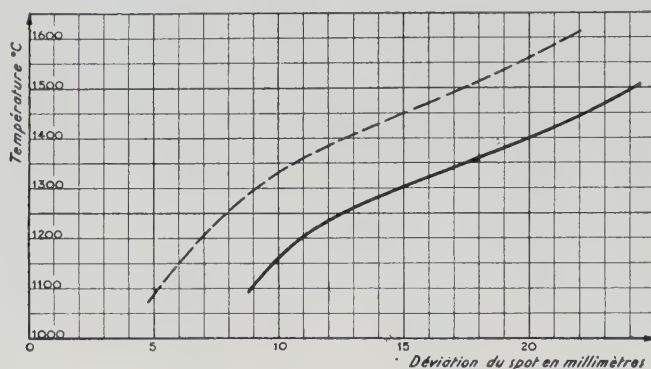


FIG. 2,6. — Pyromètre I. F. P.

Étalonnage sur corps noir.

Phot. n° 1. — Filtre RG2 de 2 mm d'épaisseur.

----- Premier étalonnage.  
—— Deuxième étalonnage.

apparaissant sur le tube cathodique et celle obtenue finalement avec l'agrandisseur utilisé existe un rapport d'amplification fixe égal à 3,15.

### Étalonnage du pyromètre.

L'appareil est étalonné par visée sur un corps noir et les déviations observées sur le tube cathodique sont rapportées à la température de cette source.

Nous avons ainsi procédé à un premier étalonnage de l'appareil aussitôt sa construction terminée. Puis le pyromètre a été emporté en Hollande où il était destiné à permettre des mesures de température de brillance de flammes dans le four expérimental d'IJmuiden. Ces expériences n'ayant eu lieu que trois mois plus tard, nous avons à ce moment réétalonné l'appareil sur corps noir. Les secondes courbes trouvées, bien que de forme analogue aux premières, sont décalées vis-à-vis de ces dernières (voir courbes des fig. 2,6 et 2,7). Pour une même déviation lue sur le tube cathodique, l'écart entre les deux courbes d'étalonnage est d'environ 150° avec la plus faible sensibilité (plot n° 1) et 75° pour la sensibilité maximum (plot n° 2).

Ces différences sont, pensons-nous, imputables à une modification lente des caractéristiques de la cellule. Elles mettent toutefois en

dans un domaine limité de température. Ces limites varient naturellement avec la résistance de charge du multiplicateur d'électrons. Les courbes données ici présentent bien une cour-

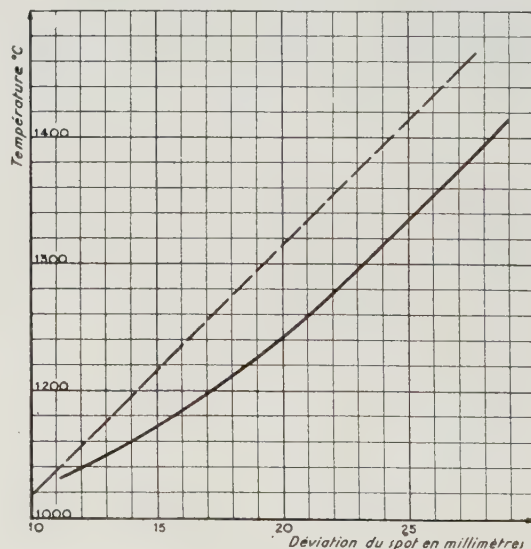


FIG. 2,7. — Pyromètre I. F. P.

Étalonnage sur corps noir.

Phot. n° 2. — Filtre RG2 de 2 mm d'épaisseur.

----- Premier étalonnage.  
—— Deuxième étalonnage.

bure régulière et sont parfaitement utilisables. Par contre, nous avons essayé au cours d'étalonnage sur une lampe à ruban de tungstène, de prolonger ces courbes vers les températures plus élevées. Nous avons alors toujours observé, à partir d'une certaine valeur de la température, un changement brusque de pente pour la courbe donnant les déviations du spot en fonction de la température de brillance de la source : une branche de pente plus forte fait suite à celle correspondant aux premières observations. Dans la zone de raccordement des deux courbes, le spot est instable et les déviations ne peuvent pas être mesurées avec une bonne précision.

### Sensibilité de l'appareil.

Les dimensions du spot fourni par le tube cathodique sont de l'ordre de  $1/4$  à  $1/3$  de mm. En se rapportant aux courbes des fig. 2,6 et 2,7, on voit que, pour la plus faible sensibilité, les dimensions du spot limitent à  $10$  à  $15^\circ$  près la précision des lectures, au delà de  $1300^\circ\text{C}$ . Audessous de cette valeur, la précision tend à décroître par suite de la diminution rapide de l'éclairement de la cellule photo-électrique quand la température décroît.

Pour la plus grande sensibilité du pyromètre, il est possible de faire des mesures à environ  $10^\circ$  près dans toute la zone  $1150$ - $1400^\circ\text{C}$ .

En résumé, compte tenu de l'évolution lente du multiplicateur d'électrons, le pyromètre décrit ici ne permet de déterminations sûres des températures en valeur absolue que si un étalonnage est fait au moment de la mesure. Par contre, la forme des courbes d'étalonnage changeant peu dans le temps, les mesures relatives de température (évaluations de fluctuations par exemple) sont toujours possibles dès l'instant qu'il s'agit d'observer des variations au moins égales à une dizaine de degrés.

### Réponse du pyromètre en fonction de la fréquence.

Ainsi qu'il est dit ci-dessus, cet appareil a été construit pour permettre de faire des mesures instantanées de température de brillance en différents points d'une flamme industrielle de grandes dimensions. L'utilisation d'un multiplicateur d'électrons et l'enregistrement du phénomène sur un tube cathodique sans l'intervention d'aucun amplificateur nous paraissaient devoir nous assurer une réponse très satisfaisante même pour des fluctuations rapides de la température de brillance.

Les résultats expérimentaux nous ont toutefois montré que, dans la flamme, apparaissent des fluctuations très rapides, de  $10$  à  $50$  par seconde, et même, dans certains cas, de  $100$  à  $200$  par seconde. Nous avons donc jugé nécessaire de vérifier a posteriori la réponse de l'appareil en fonction de la fréquence. Pour cela nous avons pointé le pyromètre sur le ruban de tungstène d'une lampe pyrométrique et le faisceau lumineux a été haché à une fréquence connue par un secteur tournant.

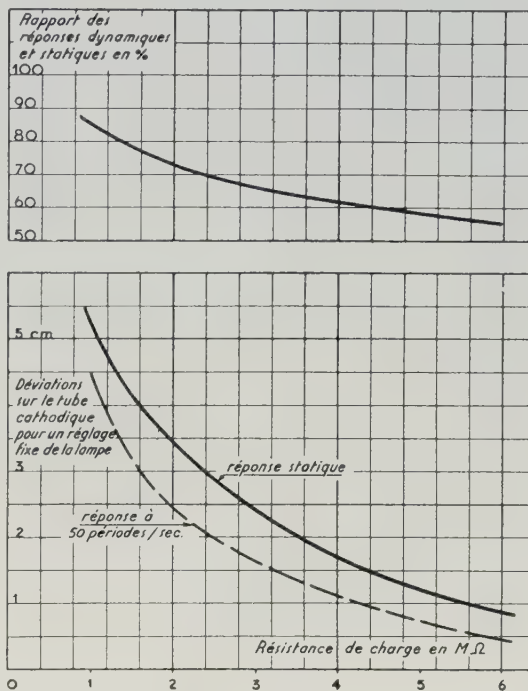


FIG. 2,8. — Pyromètre I. F. P.  
Réponse à un phénomène périodique (50 périodes par seconde) en fonction de la résistance de charge.

A une fréquence de 50 coupures par seconde, nous avons observé une diminution de l'amplitude du signal apparu sur le tube cathodique (fig. 2,8). Pour la plus faible sensibilité, cette diminution est de 29 %, tandis que, pour la plus grande sensibilité de l'appareil, elle atteint encore 14 %. Comme le montrent les figures, l'amplitude maximum du phénomène reste la même, mais le spot ne revient pas au zéro quand le secteur coupe le flux lumineux. Les amplitudes de fluctuations rapides relevées dans nos expériences ont donc été sous-estimées.

La diminution de l'amplitude en fonction de la fréquence doit être attribuée à une forte capacité répartie dans le montage qui, compte tenu

de la valeur élevée des résistances introduites dans l'alimentation du multiplicateur d'électrons, donne une constance de temps RC trop forte. Nous avons incriminé la batterie de piles. Chaque pile est constituée par 63 petits éléments du type Leclanché. Nous avons mesuré la capacité répartie dans l'un de ces éléments ; elle fut trouvée égale à  $1,5 \cdot 10^{-8}$  microfarad. La capacité répartie dans une pile est donc de l'ordre de 0,1 microfarads. Associée à une résistance de charge de l'ordre du mégohm, cette capacité fait apparaître une constante de temps de l'ordre d'un dixième de seconde.

### B. Mesures effectuées au pyromètre monochromatique à cellule.

#### Conditions expérimentales.

L'appareil décrit ci-dessus a été utilisé pour la mesure des températures de brillance d'une flamme industrielle de mazout observée dans un four expérimental installé en Hollande à IJmuiden.

Le schéma de ce four est représenté sur la figure 2,9.

La flamme observée a environ cinq à six mètres de longueur et les huit regards latéraux ménagés dans les parois du four permettent de l'observer en différents endroits, depuis le brûleur jusqu'à l'entrée dans la cheminée.

De plus, en bout du four et de part et d'autre du brûleur existent deux autres regards permettant de faire des visées longitudinales dans le four. Notons encore que, dans le but de stabiliser les conditions de fonctionnement du four et d'éliminer en particulier l'influence perturbatrice du vent, la cheminée en maçonnerie a été surmontée d'un grand venturi en tôle de 9 mètres de haut muni à sa base d'un volet mobile également en tôle. Toutes les parties en tôle risquant de chauffer ont été énergiquement refroidies par une circulation d'eau abondante (9).

Ce four a été alimenté avec 2 combustibles liquides différents : un fuel de référence et un fuel du commerce dit « navy special ». Les caractéristiques de ces deux produits étaient les suivantes :

|                         | ANALYSE ÉLÉMENTAIRE EN % |       |      | POUVOIR CALORIFIQUE SUPÉRIEUR |
|-------------------------|--------------------------|-------|------|-------------------------------|
|                         | C                        | H     | S    |                               |
| Huile de référence..... | 85                       | 11,51 | 3,83 | 10 670                        |
| « Navy special », ..... | 87,31                    | 10,81 | 1,89 | 10 360                        |

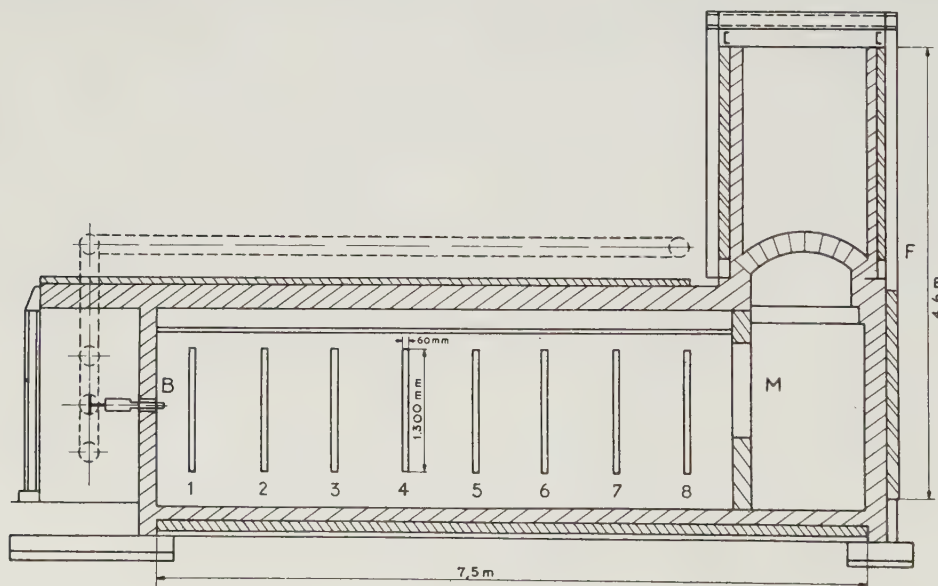


FIG. 2,9. — Four expérimental.

De nombreux pointés pyrométriques ont été effectués sur la flamme de ce four pour différentes conditions de marche.

Les observations faites se rapportent à quatre conditions expérimentales différentes, que nous appellerons I, II, III et IV.

#### I. *Fuel utilisé : navy special.*

Débit de fuel : 200 litres/heure.

Agent d'atomisation : air.

Débit d'air d'atomisation : 107 kg/heure.

Débit d'air de combustion : 2 050 m<sup>3</sup>/heure.

#### II. *Fuel utilisé : huile de référence.*

Débit de fuel : 195 litres/heure.

Agent d'atomisation : air.

Débit d'air d'atomisation : 149 kg/heure.

Débit d'air de combustion : 3 560 m<sup>3</sup>/heure.

#### III. *Fuel utilisé : huile de référence.*

Débit de fuel : 275 litres/heure.

Agent d'atomisation : vapeur saturante à 200° C

Débit de vapeur d'atomisation : 98 kg/heure.

Débit d'air de combustion : 3 320 m<sup>3</sup>/heure.

#### IV. *Fuel utilisé : huile de référence.*

Débit de fuel : 200 litres/heure.

Agent d'atomisation : air.

Débit d'air d'atomisation : 138 kg/heure.

Débit d'air de combustion : 1 930 m<sup>3</sup>/heure.

Dans ces quatre expériences, les autres variables caractéristiques du fonctionnement du four ont été maintenues aussi constantes que possible : pression intérieure, température de l'air de combustion, température du fuel, température de l'agent d'atomisation.

### Résultat des mesures.

En annexe I sont reproduites certaines des photographies prises pendant ces quatre expériences. Elles sont accompagnées des agrandissements de deux de ces photos observées à l'appareil de lecture de microfilm. La mesure des températures de brillance et de la pseudo-fréquence a été faite uniquement sur des agrandissements obtenus à l'appareil de lecture de microfilms, mais seules les photographies originales ont été reproduites ici pour raison de commodité.

#### a) *Températures des réfractaires.*

1) Au cours de l'expérience 1 l'appareil a visé la sole le long du mur sud face à la fente n° 5, c'est-à-dire à 3,30 m du brûleur. L'angle d'incidence est voisin de 60°. Les photographies

repérées : expérience I, planche II, n° 16, 17 et 18, ont fourni les températures de brillance suivantes :

1 200° C avec des fluctuations faibles de 10 à 15° C, mesurées avec la faible sensibilité de l'appareil.

1 150° C avec des fluctuations d'environ 10° C, mesurées avec la grande sensibilité du pyromètre.

Ces deux mesures de température ont été faites à quelques minutes d'intervalle seulement, pendant lesquelles la température moyenne de brillance des réfractaires n'a pas pu changer de façon sensible. Il subsiste donc, entre les mesures absolues faites sur chacune des deux sensibilités de l'appareil, un écart de température d'environ 50° C. Les légères fluctuations de température observables seulement après agrandissement, sont dues à la réflexion du rayonnement de la flamme sur les réfractaires. Or, les fluctuations de température de la flamme à hauteur de la fente étaient, au cours de cette expérience, de 80 à 100° C. Sous l'incidence considérée, le rayonnement réfléchi par les réfractaires est donc faible vis-à-vis de leur rayonnement propre.

2) Au cours de l'expérience II, l'appareil a été placé devant un des regards voisins du brûleur et il visait la sole le long du mur nord du four, entre les fentes 2 et 3, c'est-à-dire à environ 1,50 m du brûleur. Les photographies 1, 2, 3, 4, 5 et 6 ont été prises dans ces conditions.

Sur la photographie 1 on lit une température moyenne de 1 030° C, tandis que les photographies 2, 3 et 4 correspondent à 1 020° C, l'appareil fonctionnant sur sa plus grande sensibilité. Un quart d'heure avant ces mesures, un pointé fait par un autre expérimentateur au moyen d'un pyromètre optique HARTMANN et BRAUN sur la même région de la sole a fourni des températures de brillance de 1 100 à 1 120° C. Le désaccord entre les deux appareils est donc sensible car l'inertie thermique du four ne saurait faire admettre une telle variation. Il est toutefois possible que l'incidence sous laquelle travaillaient les appareils ait été plus grande pour le pyromètre optique que pour le pyromètre à cellule.

Le pyromètre à cellule ne permet de relever ici que de très faibles fluctuations de température de brillance, de l'ordre de 5° ce qui est à peine perceptible. Sous l'incidence considérée, il ne pouvait y avoir à proprement parler réflexion du rayonnement de la flamme ; toutefois, les très faibles fluctuations relevées montrent que la diffusion de ce rayonnement par les matériaux de la sole est négligeable.

**b) Température de la flamme au voisinage du brûleur.**

Les visées ont été faites dans ce cas à la fente n° 1 et l'appareil était pointé sur la flamme à 30 cm environ du brûleur. De telles mesures ont été faites pendant les expériences II, III et IV.

*Expérience II.* Photographies 7 à 17.

Les photographies 7 et 8 permettent de repérer la température de brillance moyenne de la flamme, comprise en ce point entre 1480 et 1500° C. Par ailleurs, les fluctuations mesurées sur les photographies 7, 8, 9 et 10 ont une amplitude variant de 70 à 100° C. En ce même point, des mesures ont été faites au même moment par un autre expérimentateur au moyen du pyromètre à disparition de filament Hartmann et Braun; elles ont donné les résultats suivants :

Centre de la flamme : 1410° C.

Bords de la flamme : 1540 et 1460° C.

Compte tenu de l'amplitude des fluctuations mises en évidence par le pyromètre monochromatique, ces mesures optiques s'accordent de façon satisfaisante avec les chiffres énoncés plus haut.

Les photographies 11 à 17 correspondent à l'utilisation du pyromètre monochromatique muni d'un filtre bleu d'Iéna B G 12 avec lequel l'appareil n'avait pas été étalonné. Toutefois, ces photographies ont pu être utilisées dans la mesure des pseudo-fréquences des fluctuations relevées par l'appareil.

Sur presque toutes ces photographies l'étude des fluctuations montre que l'on est en présence de deux systèmes de fluctuations superposés :

— Tout d'abord des fluctuations relativement lentes, de pseudo-période variant entre 35 et 60 ou 70 pulsations par seconde et de forte amplitude (70 à 100° C).

— A ces fluctuations se superposent d'autres fluctuations beaucoup plus rapides, de pseudo-période comprise entre 140 et 230 pulsations par seconde. Leur amplitude est toujours plus petite que celles des fluctuations plus lentes (rapport de 1/2 à 1/10 avec une valeur moyenne voisine de 1/3).

Sur une partie des photographies 15 et 17, on ne distingue vraiment qu'un seul système de fluctuations avec des pseudo-fréquences d'environ 90 pulsations par seconde.

*Expérience III.* Photographies 1 à 8.

La température moyenne repérée sur les photographies 1 et 2 est comprise entre 1460 et

1470° C (Les deux images ont d'ailleurs accidentellement chevauché).

En ce qui concerne les fréquences, les photographies 3 et 4 font apparaître deux systèmes de fluctuations : les unes sont lentes (30 à 40 pulsations par seconde) et ont une amplitude de 50 à 100° C. Les autres sont rapides (135 à 180 pulsations par seconde) et n'ont une amplitude que de 10 à 30° C.

Par contre, les photographies 5, 6, 7 et 8 ne laissent apparaître sensiblement qu'un seul système de fluctuations dont la pseudo-fréquence (70 à 110 pulsations par seconde) est intermédiaire entre les valeurs de celles du double système observé précédemment.

*Expérience IV.* Photographies 1 à 5.

La température moyenne repérée est de 1495° C sur la photographie 1 et de 1465° C sur la photographie 2.

Les photographies 3, 4 et 5 laissent apparaître de fortes fluctuations présentant encore deux systèmes. Les plus lentes (65 à 100 pulsations par seconde) ont une amplitude de 130 à 140° C. Les plus rapides (160 à 200 pulsations par seconde) ont une amplitude nettement plus petite, comprise entre 10 et 60° C.

**Remarques sur les observations de la flamme au voisinage du brûleur.**

La température de brillance de la flamme a peu varié en ce point au cours des expériences considérées; cependant, si les conditions de pulvérisation étaient semblables dans les expériences II et IV (atomisation par air et même rapport de débit en poids entre le fuel et l'air d'atomisation), l'expérience III faisait appel à la vapeur comme agent d'atomisation avec un débit en poids relativement plus faible vis-à-vis du débit de fuel. Dans la mesure où un nombre très limité d'observations a une signification, il semble que la pulvérisation par l'air fournisse une température légèrement supérieure (1480 à 1500° C pour l'expérience II, 1465 à 1495° C pour l'expérience IV) vis-à-vis de celle obtenue par pulvérisation à la vapeur (1460 à 1470° C pour l'expérience III).

En ce qui concerne les fluctuations, on peut le plus souvent déceler un double système de fluctuations; les plus lentes (30 à 50 par seconde) ont toujours une amplitude très supérieure — environ trois fois plus grande en moyenne — à celle des plus rapides (150 à 200 pulsations par seconde). Plus rarement, on ne distingue pratiquement qu'un seul système de fluctuations dont la pseudo-fréquence oscille autour de 80 à 100 par seconde. Notons que le passage du premier mode au second et réciproquement s'effectue très vite puisque les photographies étaient relevées à la file à moins d'une minute l'une de l'autre. La rapidité d'évolution des phénomènes s'explique d'ailleurs aisément si l'on veut bien remarquer que la vitesse des gaz en ce point de la flamme est, d'après d'autres mesures, de l'ordre de 100 m/s.

c) *Température de la flamme à 1,80 m du brûleur.*

Les observations correspondantes ont été faites à la fente n° 3. Dans cette section, la flamme est épaisse et son pouvoir émissif est le plus souvent voisin de 1. C'est également une région où la flamme est plus tranquille et où la combustion paraît régulière. Il a donc paru intéressant d'y observer l'importance des fluctuations éventuelles et des pointés y ont été faits pendant les expériences I, III et IV.

*Expérience I.*

Tout un film (planche I) a été consacré à ces observations et l'on a visé successivement le haut, le milieu et le bas de la flamme.

Vers le haut de la flamme, les températures de brillance sont respectivement  $1\ 440^{\circ}\text{C}$  et  $1\ 415^{\circ}\text{C}$  sur les photographies 1 et 2, les fluctuations ayant une amplitude de  $120$  à  $150^{\circ}\text{C}$ . Un pointé au pyromètre optique Hartmann et Braun fait dans les mêmes conditions par un autre expérimentateur a donné une température maximum de  $1\ 475^{\circ}\text{C}$ .

Les photographies 3, 4 et 5 font apparaître un double système de fluctuations : les unes lentes ( $8$  à  $15$  par seconde) de forte amplitude ( $60$  à  $110^{\circ}\text{C}$ ) et les autres, rapides ( $40$  à  $60$  par seconde) de plus faible amplitude ( $10$  à  $50^{\circ}\text{C}$ ). La photographie n° 6 ne laisse cependant voir qu'un système unique avec environ  $50$  pulsations par seconde et une amplitude de  $20$  à  $40^{\circ}\text{C}$ .

Au milieu de la flamme, les températures de brillance relevées sont respectivement de  $1\ 445^{\circ}$ ,  $1\ 495^{\circ}$  et  $1\ 445^{\circ}\text{C}$  sur les photographies 7, 8 et 9, avec des fluctuations d'amplitude de l'ordre de  $100$  à  $120^{\circ}\text{C}$ . Deux visées au pyromètre optique Hartmann et Braun faites dans les mêmes conditions par un autre expérimentateur ont donné les valeurs de  $1\ 440$  et  $1\ 450^{\circ}\text{C}$ .

En ce qui concerne la fréquence des fluctuations, les photographies 10 et 11 font apparaître un double système : pseudo-fréquences  $10$  à  $12$  d'une part,  $30$  à  $45$  d'autre part ; amplitudes correspondantes  $40$  à  $50^{\circ}\text{C}$  et  $10$  à  $40^{\circ}\text{C}$ . Par contre sur les photographies 12, 13 et 14 n'apparaît pratiquement qu'un seul système de fluctuations :  $20$  à  $45$  pulsations par seconde avec une amplitude variant entre  $25$  et  $75^{\circ}\text{C}$ .

Vers le bas de la flamme, les températures de brillance moyenne relevées sur les photographies 15 et 16 sont de  $1\ 430$  et  $1\ 435^{\circ}\text{C}$ . Une visée au pyromètre optique HARTMANN et BRAUN a donné dans des conditions semblables  $1\ 445^{\circ}\text{C}$ .

Sur les photographies 17, 19, 20 et 21, on distingue des fluctuations lentes ( $10$  à  $25$  par seconde) et de forte amplitude ( $80$  à  $140^{\circ}$ ) parfois à peine

modulées par des fluctuations plus rapides ( $50$  à  $60$  par seconde) et d'amplitude, souvent très faible, ne dépassant pas  $50^{\circ}\text{C}$ . Sur la photographie n° 18, par contre, il n'y a pratiquement que des fluctuations rapides ( $50$  par seconde environ) et d'amplitude assez forte :  $35$  à  $70^{\circ}\text{C}$ .

*Expérience III. Photographies 15 à 22.*

La température de brillance relevée au centre de la flamme est de  $1\ 575^{\circ}\text{C}$  sur la photographie 15 et de  $1\ 560^{\circ}\text{C}$  sur la photographie 16.

Les photographies suivantes font apparaître des fluctuations relativement lentes ( $15$  à  $50$  par seconde) avec une amplitude qui oscille entre  $110$  et  $160^{\circ}\text{C}$ . Des fluctuations plus rapides s'y superposent de façon plus ou moins apparente ( $75$  à  $100$  pulsations par seconde ; amplitude inférieure à  $40^{\circ}\text{C}$ ).

*Expérience IV. Photographies 6 à 9.*

La visée a lieu sur le centre de la flamme, sur les photographies 6 et 7, la température de brillance relevée est en moyenne de  $1\ 510$  à  $1\ 520^{\circ}\text{C}$ .

Sur les photographies 8 et 9, il n'apparaît guère qu'un seul système de fluctuations ayant une pseudo-fréquence de  $45$  à  $65$  pulsations par seconde et une amplitude de  $100$  à  $120^{\circ}\text{C}$ .

**Remarques sur les observations de la flamme à 1,80 m. du brûleur.**

L'exploration en hauteur faite pendant l'expérience I montre que la température de brillance est légèrement plus élevée au centre de la flamme que sur ses bords. Les fluctuations de température maxima sont de  $100$  à  $150^{\circ}\text{C}$  en tous les points. Les petites fluctuations rapides semblent moins importantes au centre que sur les bords.

Si l'on compare maintenant les observations des expériences I, III et IV, on constate que la température moyenne maximum correspond au plus fort débit de fuel (exp. III). L'amplitude des fluctuations observées est également plus forte dans le cas du débit maximum. Enfin, les fluctuations sont moins nombreuses dans l'expérience I (petit débit de fuel et petit débit d'air d'atomisation) que dans les expériences III (gros débit de fuel) et IV (gros débit d'air d'atomisation). Elles semblent donc en relation avec l'importance de l'énergie mise en jeu soit sous forme thermique (débit de fuel) soit sous forme mécanique (débit de l'agent d'atomisation).

d) *Température de la flamme à 3,60 m du brûleur (fente n° 4).*

A cette distance, la flamme a également un pouvoir émissif très élevé et la combustion paraît à l'observation visuelle à peu près aussi stable que devant la fente n° 3. Des observations ont été faites à cet endroit seulement au cours des expériences III et IV.

*Expérience III. Photographies 9 à 14.*

Les photographies 9 et 10 permettent d'évaluer la température moyenne de brillance à 1 540° et 1 600 °C respectivement, cette dernière valeur étant extrapolée.

Sur les photographies suivantes, on constate que les fluctuations relevées ont des vitesses très variables. Les plus lentes (10 à 20 par seconde) sont encore celles dont l'amplitude est la plus forte (plus de 100° C) tandis que les plus rapides (70 à 75 par seconde) qui se superposent parfois aux précédentes, sont beaucoup moins importantes (de quelques degrés à une cinquantaine de degrés).

*Expérience IV. Photographies 10 à 13, 16 et 17.*

La température moyenne de brillance relevée sur les photographies 10 et 11 est d'environ 1 400° C. Les fluctuations comme sur les photographies 12 et 13 sont lentes et de faible amplitude (40° environ). Les photographies 16 et 17 ont été prises, l'appareil ayant été muni d'un filtre bleu d'Iéna BG 12. Les fluctuations relevées sur ces photographies sont plus rapides (66 à 85 par seconde).

De ces quelques mesures, il résulte qu'avec un faible débit de fuel (expérience IV), la température de brillance de la flamme décroît sensiblement dans cette région alors qu'elle y est maximum pour un débit plus grand (expérience III). En ce qui concerne les fluctuations, leur amplitude est moins grande qu'à la fente III et elles ne forment plus les systèmes superposés et assez bien séparés qu'on observe à une moindre distance du brûleur.

*e) Observations de la flamme à 3,30 m du brûleur (fente n° 5).*

Une seule observation de la flamme a été faite à cette distance du brûleur au cours de l'expérience I. (Planche II, photographies 1 à 15). A cette distance et surtout pour de faibles débits de fuel, ainsi que c'était le cas dans l'expérience I, le pouvoir émissif de la flamme est beaucoup plus faible.

Le pyromètre est pointé successivement sur le haut, le milieu, puis le bas de la flamme. Les températures moyennes de brillance relevées sont de :

Haut de la flamme, 1 340 à 1 350° avec des fluctuations de 70° à 120° (photos 1 et 2).

Milieu de la flamme, 1 350 à 1 360° avec des fluctuations de 25° à 55° (photos 5 et 6).

Bas de la flamme, 1 340 à 1 345° avec des fluctuations de 30° à 85° (photos 10 et 11).

Dans ce dernier cas, une visée au pyromètre

optique Hartmann et Braun a fourni une valeur de 1 360° pour le maximum de température.

Aux différents niveaux, il est encore possible de distinguer des fluctuations lentes (environ 10 par seconde), de 40° à 60° d'amplitude en moyenne, auxquelles se superposent généralement des fluctuations plus rapides (30 à 40 par seconde) mais d'amplitude nettement plus faible (de quelques degrés à une vingtaine de degrés).

*f) Conclusions relatives à ces observations.*

De ces observations de la flamme pour différents réglages et à différentes distances du brûleur, on peut tirer les quelques conclusions suivantes, dont certaines peuvent paraître évidentes :

1) La température de brillance maximum observée dans la flamme correspond au débit maximum de fuel (expérience III, fente n° 4). Ce maximum est de 1 600° C environ.

2) La température de brillance au voisinage du brûleur paraît par contre indépendante du débit de fuel ; l'utilisation de la vapeur comme agent d'atomisation semble entraîner un abaissement de température de 10 à 20° vis-à-vis de l'emploi de l'air comprimé.

3) Les fluctuations observées dans la température de brillance peuvent atteindre et même dépasser dans toute la flamme 100° à 150° C. L'amplitude de ces fluctuations semble toutefois s'atténuer légèrement au fur et à mesure que l'on s'éloigne du brûleur.

4) Les fluctuations observées dans les différentes expériences apparaissent souvent dues à la superposition de fluctuations relativement lentes (10 à 50 par seconde) et de fluctuations plus rapides (plus de 50 par seconde). Ces deux systèmes sont mieux organisés au voisinage du brûleur que dans les parties plus lointaines de la flamme.

5) Les fluctuations les plus rapides ont une amplitude toujours inférieure à celle des fluctuations plus lentes auxquelles elles se superposent.

6) Les pseudo-fréquences observées sont nettement plus élevées au voisinage du brûleur que dans les autres parties de la flamme.

En ce qui concerne l'utilisation même du pyromètre à cellule au cours des expériences décrites ci-dessus, son intérêt était surtout l'observation des fluctuations importantes qu'une observation visuelle faisait pressentir sans en permettre l'analyse. Sans doute, l'origine de ces fluctuations reste à déterminer ; elles semblent a priori liées au régime hydrodynamique des gaz dans le four. Ces travaux entrent dans le cadre d'une étude très générale sur le mécanisme d'échange

d'énergie entre une flamme rayonnante de type industriel et le four qui l'environne, étude poursuivie sous forme coopérative par les organismes intéressés de quatre pays différents (\*).

Dans le cadre de cette étude, il est apparu que le pyromètre qui vient d'être décrit présentait un angle d'ouverture trop grand, sa valeur de  $4^{\circ}48'$  correspondant à une visée venant couvrir une surface d'une vingtaine de cm de diamètre sur la flamme observée à deux ou trois mètres de distance. Le signal électrique fourni par le pyromètre correspondait donc à une somme de l'énergie émise dans un volume de flamme de dimensions relativement grandes. Par ailleurs, il était évidemment d'un grand intérêt de pouvoir déterminer localement dans la flamme non seulement la température de brillance, mais aussi la température vraie et le facteur d'émission correspondant. Ce résultat paraissait pouvoir être atteint en appliquant la méthode de Kurlbaum.

Dans une flamme où les fluctuations de température sont de l'ordre de celles décrites ci-dessus, les visées optiques successives qu'exige la méthode de Kurlbaum ne sont pas comparables entre elles et la méthode est inapplicable. Nous avons pensé qu'un pyromètre à cellule dénué d'inertie pouvait toutefois permettre de résoudre le problème et c'est ce qui nous a amené à réaliser le montage décrit ci-dessous.

sible est toujours constituée par une cellule photo-électrique à multiplication d'électrons, du type 931 A enfermée dans le même boîtier à refroidissement par circulation d'eau. Toutefois les écrans qui limitaient alors le champ de visée de la cellule sont ici remplacés par une lunette comportant une lentille plan-convexe de 25 cm de distance focale (fig. 2,10). A son foyer un diaphragme circulaire de 0,5 mm de diamètre limite l'ouverture de l'appareil à 7 minutes seulement. La cellule photo-électrique reçoit tous les rayons traversant l'ouverture, y compris la quasi totalité de ceux qui sont diffractés sur les bords de l'écran. Le filtre monochromatique RG 2 d'Iéna déjà utilisé précédemment est intercalé entre la cellule et le diaphragme.

### Étalonnage.

Grâce à sa très faible ouverture, l'appareil a été commodément étalonné sur une lampe à ruban de tungstène dont une lentille fournissait une image couvrant complètement le pyromètre. La température de brillance de l'image du filament était mesurée au moyen d'un pyromètre optique Ribaud. La courbe de la fig. 2,11 fournit la correspondance entre les déviations observées sur le tube cathodique et la température de brillance.

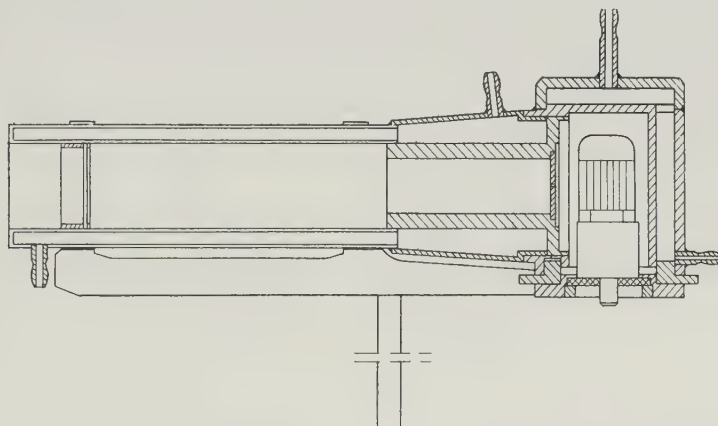


FIG. 2,10. — Pyromètre monochromatique à très faible ouverture.

### C. *Pyromètre monochromatique à cellule à très faible ouverture.*

Cet appareil est une simple modification de l'appareil qui vient d'être décrit. La partie sen-

Il est à remarquer, comme dans le cas précédent, que la courbe d'étalonnage présente une rapide variation de pente à partir d'une température de  $1850^{\circ}\text{C}$ . Pour analyser de plus près ce phénomène, nous avons mesuré la chute du potentiel aux bornes de la résistance d'anode ce qui nous a permis de reconnaître que l'anomalie observée correspond à une chute de potentiel

(\*) La participation française est représentée par le Comité Français d'Étude du Rayonnement des Flammes.

d'une centaine de volts. A ce moment, l'anode devient donc plus négative que la dinode n° 9. Pratiquement, la cellule change brusquement de caractéristique, une partie des électrons émis par la dynode n° 8 passant directement sur l'anode. Nous avons d'ailleurs constaté que

tal d'IJmuiden, l'appareil a été utilisé selon le plan représenté schématiquement sur la fig. 2,13. L'appareil reçoit la lumière émise par la flamme à travers un regard du four. Un regard symétrique dans la paroi opposée du four permet de superposer au rayonnement de la flamme celui

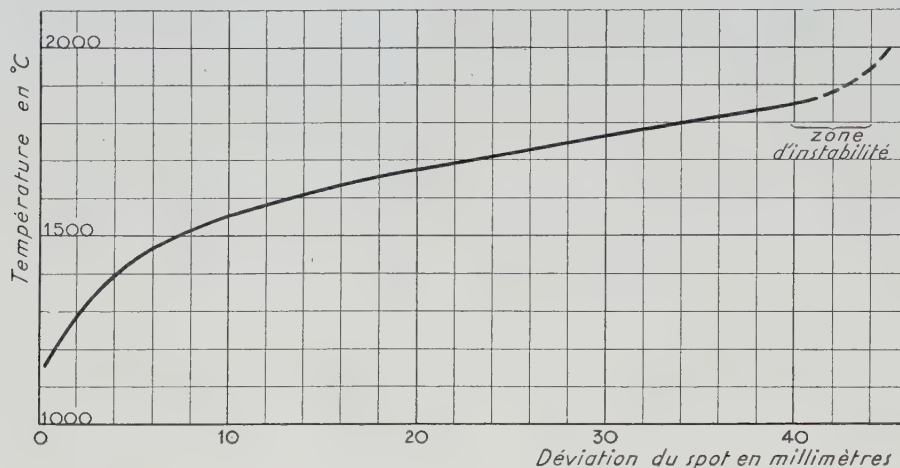


FIG. 2, II. — Pyromètre monochromatique à très faible ouverture.  
Filtre de Iéna RG2 de 2 mm.

dans ces conditions il était possible de débrancher la dynode n° 9 sans modifier la position du spot sur l'écran de l'oscillographe.

Par ailleurs, mettant à profit notre expérience antérieure, nous avons construit pour mettre la cellule sous tension, une alimentation-sec-

d'une lampe à ruban de tungstène appelée lampe principale sur la fig. 2,13. Le faisceau émis par la lampe est coupé un temps sur deux par un secteur tournant à environ 1 200 t/m (soit 40 pér./s compte tenu des deux pales du secteur). Par ailleurs un miroir tournant à 300 t/m coupe

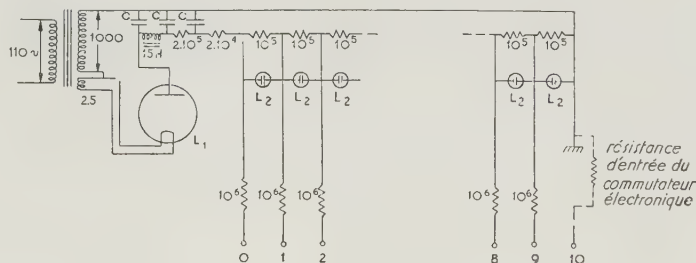


FIG. 2,12. — Schéma de l'alimentation stabilisée à 1 000 volts,

teur stabilisée dont le schéma est représenté sur la figure 2,12. Ce dispositif fait disparaître la forte capacité répartie des piles et, ainsi alimenté, le pyromètre n'a marqué aucune diminution d'amplitude pour des fréquences atteignant 50 périodes par seconde.

### Utilisation de l'appareil.

Construit pour permettre la mise en œuvre de la méthode de Kurlbaum sur le four expérimental.

à certains moments tout rayonnement venu du four pour lui substituer le seul rayonnement émis par une deuxième lampe à ruban de tungstène, dite lampe secondaire. On règle par un étalonnage préalable l'intensité passant dans la lampe secondaire pour que la brillance de son image dans le miroir,  $b_s$ , soit égale à la brillance de la lampe principale. Dans ces conditions, le signal photographié sur le tube cathodique représente :

1) Quand le miroir tournant est en dehors du

champ du pyromètre, un signal proportionne à  $b_F$  ou à  $b_{F+S}$  selon la position du secteur tournant.

2) Quand le miroir tournant a coupé le rayonnement du four, un signal proportionnel à la brillance  $b_S$  de la lampe secondaire.

### Résultats d'expérience <sup>(1)</sup>.

Quelques mesures de température vraie des flammes ont été faites avec cet appareil sur une flamme industrielle. Les fig. 2,14 et 2,15 donnent un exemple de l'aspect des enregistrements

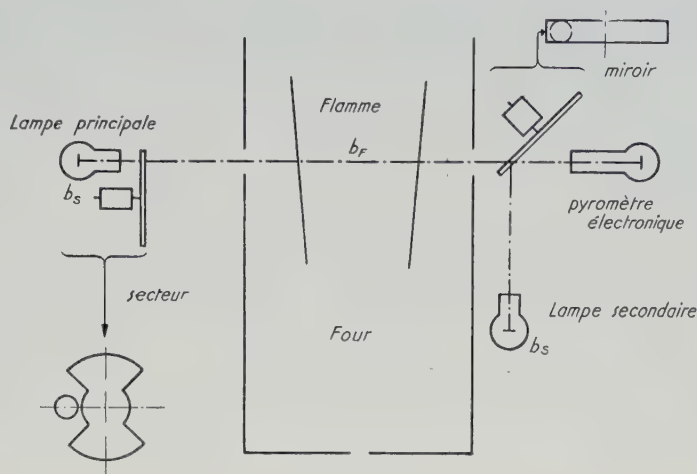


FIG. 2,13.

Nous avons ainsi les 3 termes permettant de calculer le pouvoir émissif  $\epsilon$  de la flamme et, par suite, sa température vraie à partir de l'équation :

$$b_{F+S} = b_F + (1 - \epsilon) b_S$$

effectués par photographie sur le tube cathodique.

Prenons la fig. 2,14. Entre les pointillés verti-

(1) Les expériences citées ont été faites sur le four expérimental d'IJmuiden en collaboration avec M. F. KERMAREC, Ingénieur de recherches à l'Institut Français du Pétrole.

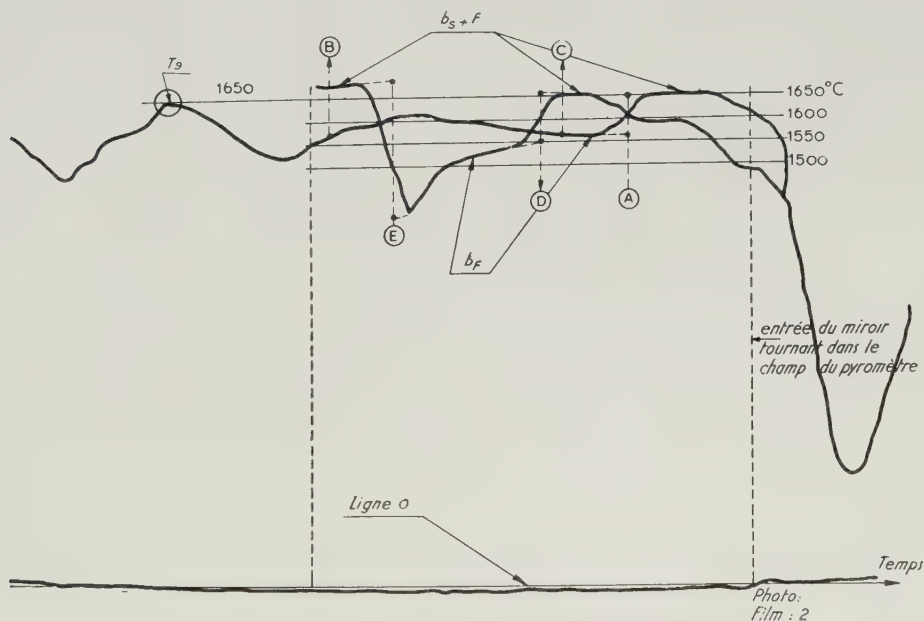


FIG. 2,14.

caux s'étend la zone où le spot représente alternativement le rayonnement de la flamme seule, puis le rayonnement de la flamme et de la lampe principale. Par suite des fluctuations de la flamme, la comparaison des brillances :  $b_{F+S}$  et  $b_F$  ne peut se faire qu'en A, en D et en E.

de la température de la lampe secondaire qui était de  $1610^{\circ}\text{C}$ . Il n'y a plus ici aucune fluctuation apparente de brillance ; cela signifie que la flamme avait alors un pouvoir émissif très sensiblement égal à l'unité et que l'apparition ou la disparition du rayonnement de la lampe

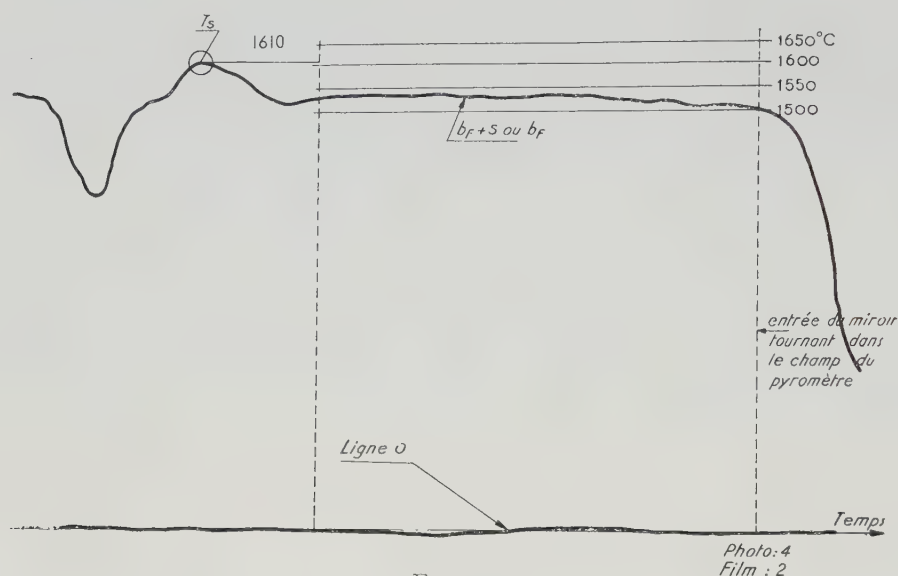


FIG. 2,15.

A gauche de la figure, le maximum correspond au signal fourni par la lampe secondaire seule. Seul le maximum est à considérer car le miroir, pour des raisons de construction mécanique, ne couvrait le champ du pyromètre que pendant une fraction de sa rotation. La partie droite de la figure correspond à l'entrée de la monture du miroir tournant dans le champ du pyromètre. L'échelle thermométrique indiquée sur la fig. 2,14 est déduite de photos successives pour lesquelles on avait pris différentes valeurs de la température de brillance de la lampe secondaire.

principale n'apportait plus aucune contribution au signal reçu par le pyromètre.

Sans entrer dans le détail des résultats acquis qui font partie de l'ensemble des travaux du « Comité d'études sur le rayonnement des flammes », notons toutefois en passant un fait curieux qui ressort de la comparaison en un point de la flamme de sa température vraie et de son pouvoir émissif monochromatique. Pour un même réglage des conditions de marche du four expérimental et en un même point de la flamme, les résultats suivants ont été obtenus à quelques minutes d'intervalles :

|                                       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Pouvoir émissif monochromatique ..... | 0,5   | 0,35  | 0,66  | 0,58  | 0,29  | 0,25  | 0,60  | 0,16  | 0,36  | 0,34  | 0,36  | 0,35  |
| Température vraie .....               | 1 750 | 1 795 | 1 670 | 1 630 | 1 735 | 1 865 | 1 720 | 1 960 | 1 745 | 1 810 | 1 780 | 1 795 |

La fig. 2,15 représente la photographie prise quelques minutes après la précédente dans les mêmes conditions expérimentales à l'exception

Ces résultats sont reportés sur la fig. 2,16. Ce graphique fait ressortir qu'il existe très vraisemblablement, entre le pouvoir émissif mono-

chromatique de la flamme et sa température vraie, une corrélation assez étroite et que, plus le pouvoir émissif est faible, plus la température est élevée. Ce fait peut s'expliquer

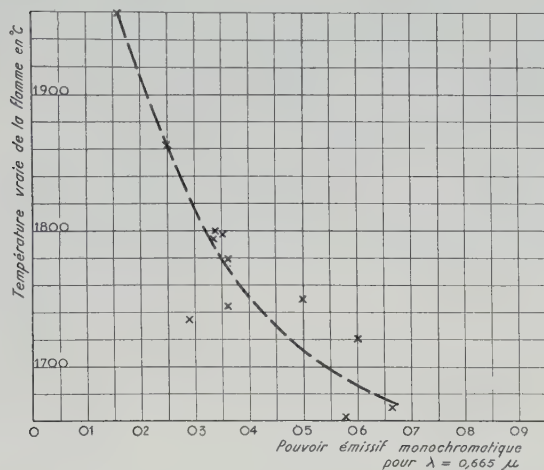


FIG. 2,16. — Pouvoir émissif de la flamme rapporté aux températures vraies.

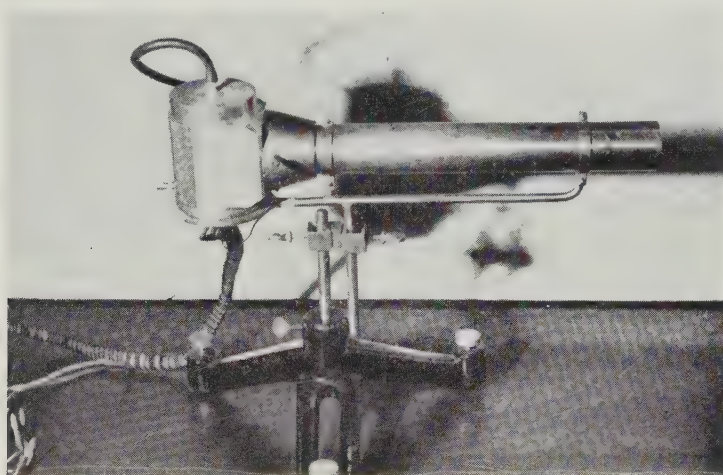
— d'une part par suite de l'augmentation de la température au fur et à mesure que la combustion progresse, cette progression de la com-

bustion entraînant la disparition des particules de carbone responsables du rayonnement,

— d'autre part par suite du refroidissement de la flamme par rayonnement quand elle possède un pouvoir émissif élevé.

Ces deux facteurs jouent dans le même sens.

Cette deuxième version du pyromètre monochromatique à cellule a permis de résoudre le problème consistant à mesurer de façon instantanée, en un point donné d'une flamme turbulente, sa température vraie et son pouvoir émissif. La valeur trouvée correspond à une moyenne à travers la flamme, le long de l'axe optique du pyromètre. Il n'en reste pas moins que, sur un four de grandes dimensions, la méthode est rendue difficile par l'alignement minutieux des appareils qu'il faut réaliser avant toute mesure. Elle a donc, par la suite, été abandonnée à IJmuiden pour être remplacée par une méthode cinématographique beaucoup plus simple à mettre en œuvre auprès du four (13). Par contre, le pyromètre monochromatique serait peut être plus avantageux dans le cas d'expériences faites sur un foyer de plus petites dimensions que le four d'IJmuiden, ce qui faciliterait la mise en place des appareils ; on bénéficierait alors d'un dépouillement des résultats aisé et immédiat.



Pyromètre monochromatique à cellule.

## La pyrométrie à deux couleurs et son application au moteur Diesel.

Il est vraisemblable que la première estimation que l'homme ait su faire des températures élevées a été basée sur l'appréciation de la couleur. Les expressions rouge sombre, rouge cerise, blanc, marquent les échelons de température qui, dans bien des industries, sont encore d'un usage courant.

Naturellement, l'aspect coloré des corps incandescents n'a de valeur que pour autant qu'il s'agisse de l'émission d'un spectre continu. On donne (26) de la température de couleur les 3 définitions suivantes :

1° La température de couleur d'une source est la température  $T$  du corps noir qui a, dans le spectre visible, même distribution spectrale relative que la source étudiée.

2° La température de couleur de la source est la température  $T_c$  du corps noir, qui, pour les longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  possède des brillances  $b_{\lambda_1 T_c}^0$  et  $b_{\lambda_2 T_c}^0$  dont le rapport est égal à celui des brillances de la source  $b_{\lambda_1 T}$  et  $b_{\lambda_2 T}$ . Si  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  sont pris dans le rouge et dans le bleu, cette méthode est dite, de façon plus concise, la méthode du rapport rouge-bleu.

3° La température de couleur d'une source peut s'obtenir en comparant la lumière de cette source à celle d'un corps noir dont on fera varier progressivement la température de façon à l'amener à avoir même couleur que la source.

Dans tout ce qui suit, nous nous rapporterons à la seconde de ces définitions chaque fois que nous parlerons d'une température de couleur. En réalité, les trois définitions conduisent à des valeurs extrêmement voisines lorsqu'il s'agit des métaux. Pour d'autres solides à rayonnement sélectif, il pourrait apparaître de grands écarts (comme par exemple dans le cas des mélanges d'oxydes utilisés dans les manchons

Auer qui présentent une brillance relativement très forte dans le vert.) Le carbone possède par contre des propriétés émissives très favorables et, dans tout le visible, il peut être assimilé à un corps gris en première approximation.

Nous avons montré au chapitre I que les particules de carbone contenues dans les flammes de diffusion peuvent être considérées comme en équilibre de température, avec les gaz environnants. Il pouvait dès lors paraître séduisant de mettre à profit le rayonnement de ces particules pour en tirer une mesure de la température de la flamme elle-même.

### I. — Travaux antérieurs.

La plupart des travaux dans ce domaine font état de résultats acquis dès 1932 par H. C. HOTTEL et F. P. BROUGHTON (17). Par suite de son importance, nous allons résumer brièvement ici la publication de ces auteurs.

**Travaux de H. C. HOTTEL et F. P. BROUGHTON (1932).**

Ces auteurs se sont proposés de déterminer, à partir d'une mesure de température de couleur, la température vraie et le pouvoir émissif d'une flamme éclairante.

La base théorique de leur méthode est la suivante :

— soit un pyromètre optique visant une flamme et soit  $T_R$  la température de brillance (en °K) dans le rouge, tandis que  $T$  (en °K) est sa température vraie. On a, d'après la loi de Wien

$$\frac{I}{T_R} - \frac{I}{T} = -\frac{\lambda_R}{C_2} \log \varepsilon_R \quad [1]$$

$\varepsilon_R$  : pouvoir émissif de cette flamme pour la longueur d'onde  $\lambda_R$  ( $0 < \varepsilon_R < 1$ ).

Si  $L$  est l'épaisseur de la flamme et  $A_\lambda$  son coefficient d'absorption monochromatique, on a :

$$\varepsilon_\lambda = A_\lambda = 1 - e^{-k_\lambda L} \quad [2]$$

$k_\lambda$  est un coefficient qui dépend de  $\lambda$ . Dans un domaine spectral limité, on peut poser :

$$k_\lambda = \frac{k}{\lambda^\alpha} \quad [3]$$

où  $k$  et  $\alpha$  sont constants. En groupant les équations précédentes, il vient :

$$\varepsilon_\lambda = 1 - e^{-kL/\lambda^\alpha} \quad [4]$$

Des équations [1] et [4] on tire immédiatement :

$$\frac{I}{T_R} - \frac{I}{T} = -\frac{\lambda_R}{C_2} \log \left( 1 - e^{-kL/\lambda_R^\alpha} \right) \quad [5]$$

Une seconde mesure de température de brillance, faite dans le vert par exemple, fournira de même l'équation :

$$\frac{I}{T_V} - \frac{I}{T} = -\frac{\lambda_V}{C_2} \log \left( 1 - e^{-kL/\lambda_V^\alpha} \right) \quad [6]$$

Ces deux équations [5] et [6] permettent de calculer la valeur des deux inconnues  $T$  et  $kL$ . Les auteurs ajoutent que le pouvoir émissif total de la flamme s'obtient par une intégration

$$\varepsilon = \frac{\int_0^\infty \varepsilon_\lambda E_\lambda d\lambda}{\sigma T^4} \quad [7]$$

où  $E_\lambda$  est la puissance rayonnée par le corps noir à la température  $T$  et pour la longueur d'onde  $\lambda$ .

Partant de cette base théorique, HOTTEL et BROUGHTON ont construit un pyromètre à deux couleurs. Les longueurs d'onde utilisées ont été soigneusement déterminées et l'étalonnage de l'appareil a été fait sur corps noir.

Par ailleurs, ils ont déterminé de leur mieux la valeur de l'exposant  $\alpha$ . Ils ont, pour cette détermination, utilisé les résultats de plusieurs auteurs portant sur des flammes lumineuses de différentes origines. L'ensemble de ces résul-

tats présente toutefois une assez grande dispersion. Les auteurs ont retenu pour  $\alpha$  la valeur de 1,39 dans le visible avec une erreur qui, rapportée aux mesures faites sur la flamme d'acétate d'amyle, ne dépasse pas 20 %. Ils font heureusement remarquer que, en prenant  $\alpha = 1,7$  au lieu de 1,39, la température calculée de la flamme de l'étalon Hefner ne varie que de 7,6° K. Il n'en reste pas moins que cette détermination reste le point faible de la méthode décrite ci-dessus.

Ayant déterminé la température vraie  $T$  et le facteur  $kL$  relatifs à la flamme, les auteurs fournissent le moyen de déterminer le pouvoir émissif total de la flamme grâce à un abaque. Dans l'établissement de ce dernier, il faut tenir compte de la contribution du gaz carbonique et de la vapeur d'eau. Des mesures directes de ce pouvoir émissif total ont indiqué des erreurs de l'ordre de 6 à 7 %, ce qui est satisfaisant dans la plupart des cas.

Dans le moteur Diesel, la combustion du gas-oil s'accompagne d'une flamme très lumineuse et de nombreux auteurs à la suite de HOTTEL et de BROUGHTON ont cherché à mettre à profit cette circonstance pour en tirer une méthode de mesure de la température des gaz en évolution dans le cylindre.

Il convient de vérifier que l'émission d'une telle flamme présente, au moins dans un domaine spectral assez étendu, un spectre continu. Ceci a été mis en évidence dans plusieurs travaux, tels que ceux de G. BECK et Ch. ERICHSEN (4), K. KARDE (18), LANDEN et BLANC (22), LANDEN (20). Les travaux allemands présentent de beaux enregistrements spectrographiques de la flamme en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin, l'analyse s'étendant de la région du spectre visible jusque dans l'ultraviolet (entre 6 000 et 3 000 Å environ). Les figures obtenues sont très caractéristiques : dès que la flamme apparaît, l'émission s'étend vers les courtes longueurs d'onde, pour graduellement diminuer et ne se prolonger que dans la partie rouge du spectre. La fig. 3,1 présente un enregistrement de ce genre pris par nous dans la préchambre d'un moteur CFR Diesel ; le spectre de raies qui précède la flamme est celui d'une lampe à néon servant à l'étalonnage en longueur d'onde. Le film utilisé est une émulsion Kodak super XX dont la sensibilité tombe pratiquement à zéro pour une longueur d'onde de 6 000 Å environ, tandis que celle présente un minimum dans le vert aux environs de 5 400 Å. Sur cette photographie, comme sur celles relevées par les auteurs allemands, l'émission de la flamme dans la partie

visible du spectre apparaît comme continue. Les travaux allemands font état de différents systèmes de bandes dus à OH, CH et CC, mais ces bandes ne sont nettes que dans l'ultraviolet. Ces mêmes bandes sont au contraire très visibles dans le spectre d'émission des moteurs à allu-



FIG. 3, 1.

mage commandé (38). LANDEN ne signale dans ses enregistrements que les bandes de OH à  $3\,064\text{ \AA}$  et  $2\,811\text{ \AA}$ , la première étant même le plus souvent assez peu apparente sur le fond continu.

#### Travaux de O. A. UYEHARA et P. S. MYERS (23) (34) (35).

Seuls ou en collaboration avec les professeurs K. M. WATSON et L. A. WILSON, ces auteurs ont construit un pyromètre et fait toute une série de mesures de température sur les flammes dans les moteurs Diesel. Les résultats qu'ils ont obtenus recoupent ceux que nous présentons ci-dessous et nous pensons qu'il est intéressant de décrire les conditions expérimentales réalisées par eux.

S'inspirant des travaux de HOTTEL et BROUGHTON, UYEHARA et MYERS ont choisi la méthode de la pyrométrie à deux couleurs. Les flammes qui se développent dans la chambre de combustion d'un moteur Diesel évoluent rapidement et il convient qu'un appareil destiné à mesurer leur température soit autant que possible dénué d'inertie.

UYEHARA et MYERS ont donc construit un pyromètre à cellules photo-électriques à vide et à cathode caesium-oxyde d'argent. Les deux longueurs d'onde utilisées ont été obtenues, non par un système de filtres comme dans l'appareil de Hottel et Broughton, mais par un système de deux prismes et de lentilles constituant un véritable spectroscopie (fig. 3,2).

Le rayonnement émis par la flamme sort tout d'abord de la chambre de combustion en traversant une fenêtre de quartz et est condensé sur le diaphragme d'entrée du pyromètre qu'il couvre complètement, éliminant ainsi l'influence de vibrations possibles du moteur. Le faisceau

lumineux est rendu parallèle par une lentille en arrière de ce diaphragme, dispersé par les deux prismes, puis focalisé à nouveau par des lentilles. Deux fentes situées dans le plan focal ne laissent passer que les radiations correspondant à deux longueurs d'onde différentes, et chacun des faisceaux résultants est reçu par une cellule photo-électrique.

Les signaux des deux cellules sont recueillis par des amplificateurs à couplage direct dont la réponse est uniforme, d'après les auteurs, entre 0 et 15 000 périodes par seconde environ. Ces amplificateurs sont à deux étages, le premier étant alimenté par batterie pour assurer une bonne stabilité. Le second étage constitue un montage en push-pull et est alimenté par une tension redressée et stabilisée. Les tensions fournies par les amplificateurs sont appliquées aux plaques de déviation verticale de deux oscillographes à simple faisceau. Les spots de ces oscillographes se déplacent horizontalement de façon synchrone proportionnellement à l'angle de rotation du vilebrequin du moteur. Les figures tracées sur les tubes cathodiques sont relevées par photographie simultanée.

Les longueurs d'onde utilisées dans ces expériences sont  $\lambda = 0,696\mu$  et  $\lambda = 0,902\mu$ . Les va-

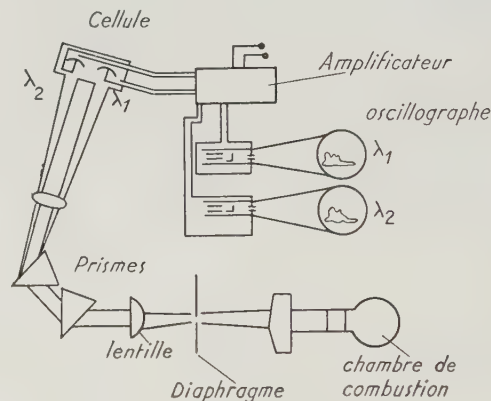


FIG. 3, 2. — Schéma du pyromètre électro-optique de P. MYERS et de O. UYEHARA.

$$\lambda_1 = 8000\text{ \AA}$$

$$\lambda_2 = 5020\text{ \AA}$$

leurs du coefficient  $\alpha$  introduit par HOTTEL et BROUGHTON dans l'expression du coefficient d'absorption monochromatique ont été choisies ici respectivement égales à  $\alpha = 1,32$  et  $\alpha = 1,05$ .

Les auteurs ont ensuite étalonné leur pyromètre sur un corps noir, puis ont tracé l'abaque donnant les températures vraies en fonction des

déviation lue sur les tubes cathodiques (fig. 3.3). On remarque immédiatement sur cette figure que si, pour une émission de corps noir (ligne en pointillé), les déviations sur les 2 voies sont proportionnelles quelle que soit l'intensité lumineuse reçue, il n'en est pas tout à fait de même pour l'émission des flammes. La quantité de lumière reçue par l'appareil intervient donc dans une certaine mesure. C'est ainsi que, contrairement à ce qu'indiquent les auteurs, l'encrassement de la fenêtre de quartz placée sur le moteur pourrait en toute rigueur faire varier la température repérée.

deux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  le rapport des énergies émises dans ces domaines égal à

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}} \left( \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^5 e^{-C_1/T(1/\lambda_1 - 1/\lambda_2)}$$

Le terme  $\frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}}$  étant pris égal à une constante, la relation offre le moyen de déterminer T par une mesure du rapport  $\frac{E_1}{E_2}$ . Ceci n'est autre que la mesure d'une température de couleur. Sur cette base, UYEHARA et MYERS (23) ont cons-

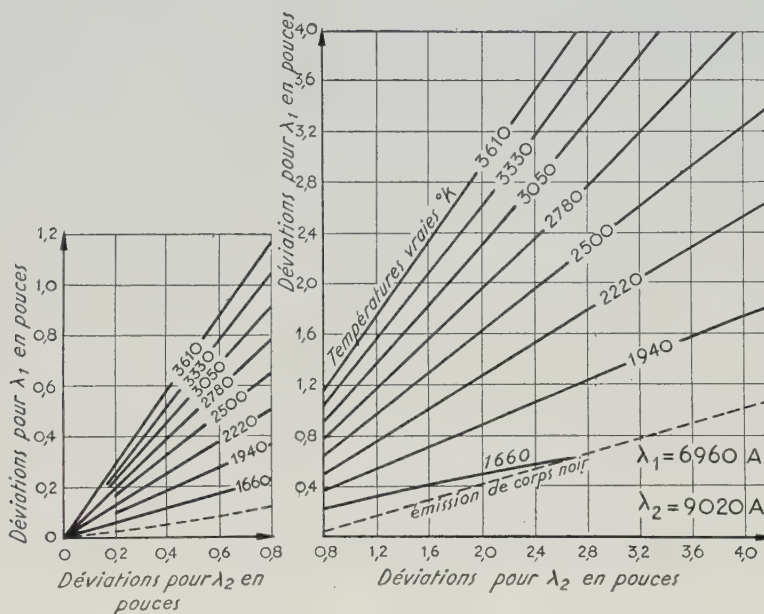


FIG. 3. 3. — Température vraie en fonction des déviations des spots en fonction des tubes cathodiques.

C'est avec l'appareil ainsi construit et étalonné que MYERS et UYEHARA ont procédé à une série de mesures sur moteur Diesel. Nous comparons ci-dessous leurs résultats avec ceux que nous avons obtenus.

Remarquons cependant encore que, dans des travaux ultérieurs, ces auteurs ont modifié leur appareil. Ils ont montré que, dans tout le domaine des températures relevées dans le moteur Diesel, on pouvait considérer que le rapport  $\frac{A_{\lambda_1}}{A_{\lambda_2}}$  des coefficients d'émission de la flamme pour les deux longueurs d'onde  $\lambda_1$  et  $\lambda_2$  restait constant. D'après la loi de Wien, on a pour les

truit un dispositif électronique fournissant directement le rapport  $\frac{E_1}{E_2}$  (fig. 3.4). Le principe en est ingénieux, mais la réalisation d'un appareil comportant d'aussi nombreux circuits reste délicate lorsqu'il convient d'en tirer des mesures quantitatives.

Un pyromètre à deux couleurs sans inertie a également été construit par LANDEN (20). Cet appareil comporte un prisme et deux cellules photo-électriques recueillant le rayonnement dans les deux longueurs d'onde de 8 000 Å et 5 020 Å (fig. 3.5). Toutefois cet auteur n'a fourni aucune indication sur l'étalonnage de son pyro-

mètre et les résultats dont il fait état sont seulement qualitatifs.

reçue. La lentille est réglée pour former sur les cellules l'image de l'écran diffusant.

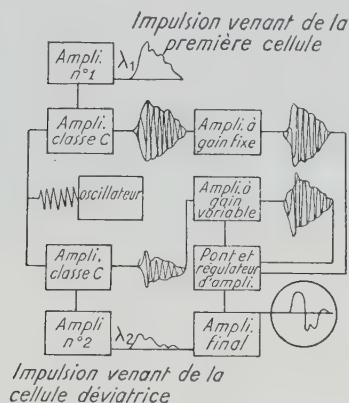
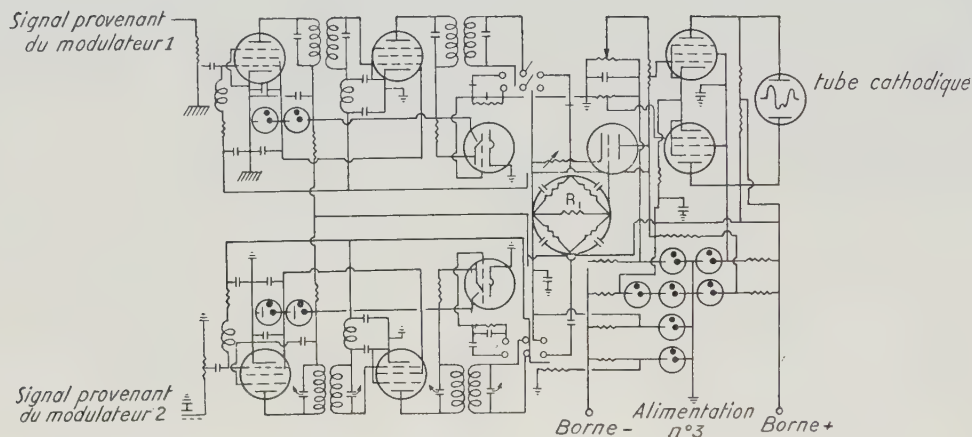


FIG. 3, 4.

← Schéma du circuit fournissant directement le rapport des impulsions reçues par les deux cellules.

↓ Schéma de montage du circuit diviseur de courant.



## II. — Travaux personnels.

### Description du pyromètre à deux couleurs.

L'appareil est représenté schématiquement sur la figure 3,6. Le faisceau de lumière incidente émise par la flamme tombe d'abord sur un écran diffusant. En arrière de l'écran, une lentille reprend la lumière transmise et, à travers un prisme P à réflexion totale, l'envoie sur un miroir semi-transparent M faisant un angle de 45° avec l'axe du faisceau lumineux. Ce faisceau est alors scindé en un faisceau réfléchi et en un faisceau transmis qui traversent respectivement des filtres rouge et vert. En arrière les deux faisceaux lumineux ainsi filtrés sont reçus par deux cellules multiplicateurs d'électrons qui traduisent électriquement les quantités d'énergie lumineuse

Le filtre vert est un filtre interférentiel construit au laboratoire de l'électro-aimant à Bellevue par M. DUFOUR (11). Son maximum de

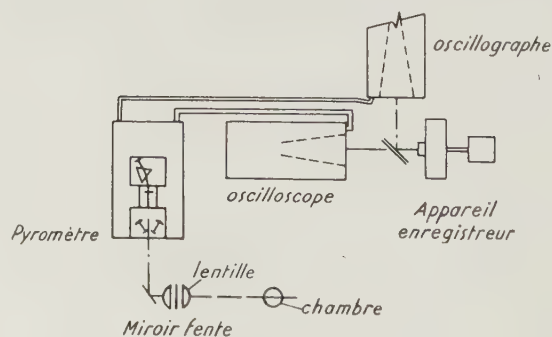


FIG. 3, 5. — Pyromètre LANDEN.

transmission se situe à  $0,555 \mu$ , sa bande passante étant d'environ  $100 \text{ \AA}$ .

Le filtre rouge est un verre d'Iéna RG2 de 2 mm d'épaisseur. Sa transmission, qui est de 0,98 pour une longueur d'onde de  $0,7 \mu$ , tombe rapidement à 0,85 pour  $0,644 \mu$ , 0,61 pour  $0,64 \mu$ , 0,07 pour  $0,630 \mu$  et 0,001 pour  $0,62 \mu$ .

Les cellules photo-électriques utilisées sont des multiplicateurs d'électrons RCA du type 931 A. La réponse de ces cellules est maximum dans la partie bleue du spectre visible. La courbe de la fig. 3,7 indique la forme de la réponse électrique d'une cellule 931 A placée successivement derrière le filtre vert interférentiel et derrière le filtre d'Iéna RG2, en supposant qu'elle reçoit la lumière émise par un corps noir porté à  $1900^\circ \text{ K}$ . Les valeurs de l'énergie émise par le corps noir sont reportées sur cette courbe en valeur relative. Le signal électrique reçu dans les deux cas est

proportionnel à l'aire des surfaces hachurées. On voit immédiatement que, pour des conditions égales d'éclairement, les signaux recueillis dans les deux cas seront sensiblement équivalents. Par ailleurs, les longueurs d'onde effectives du système seront respectivement de  $0,655 \mu$  dans le rouge et de  $0,55 \mu$  dans le vert, avec une bande passante dans le rouge sensiblement double de celle correspondant au vert.

Le miroir semi-transparent M est constitué par une couche de sulfure d'antimoine. Par suite des propriétés optiques de ce corps, les faisceaux transmis et réfléchis n'ont pas exactement la même composition spectrale. Toutefois, pour une lumière incidente de composition donnée, il n'en reste pas moins que le rapport de l'énergie lumineuse apportée par les deux faisceaux résultants aux deux multiplicateurs d'électrons reste fixe, quelle que soit l'intensité du faisceau incident.

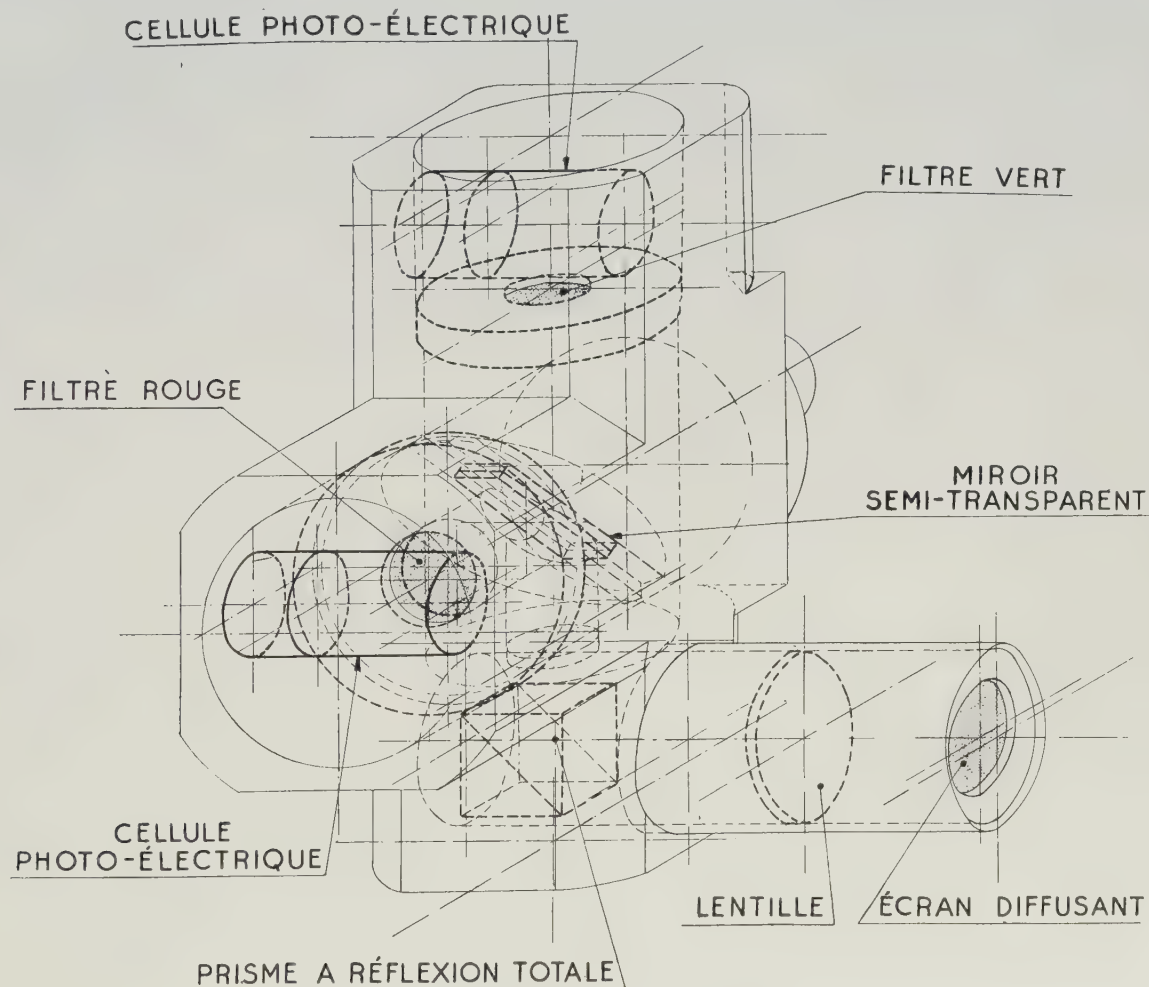


FIG. 3, 6. — Pyromètre à cellules à deux couleurs.

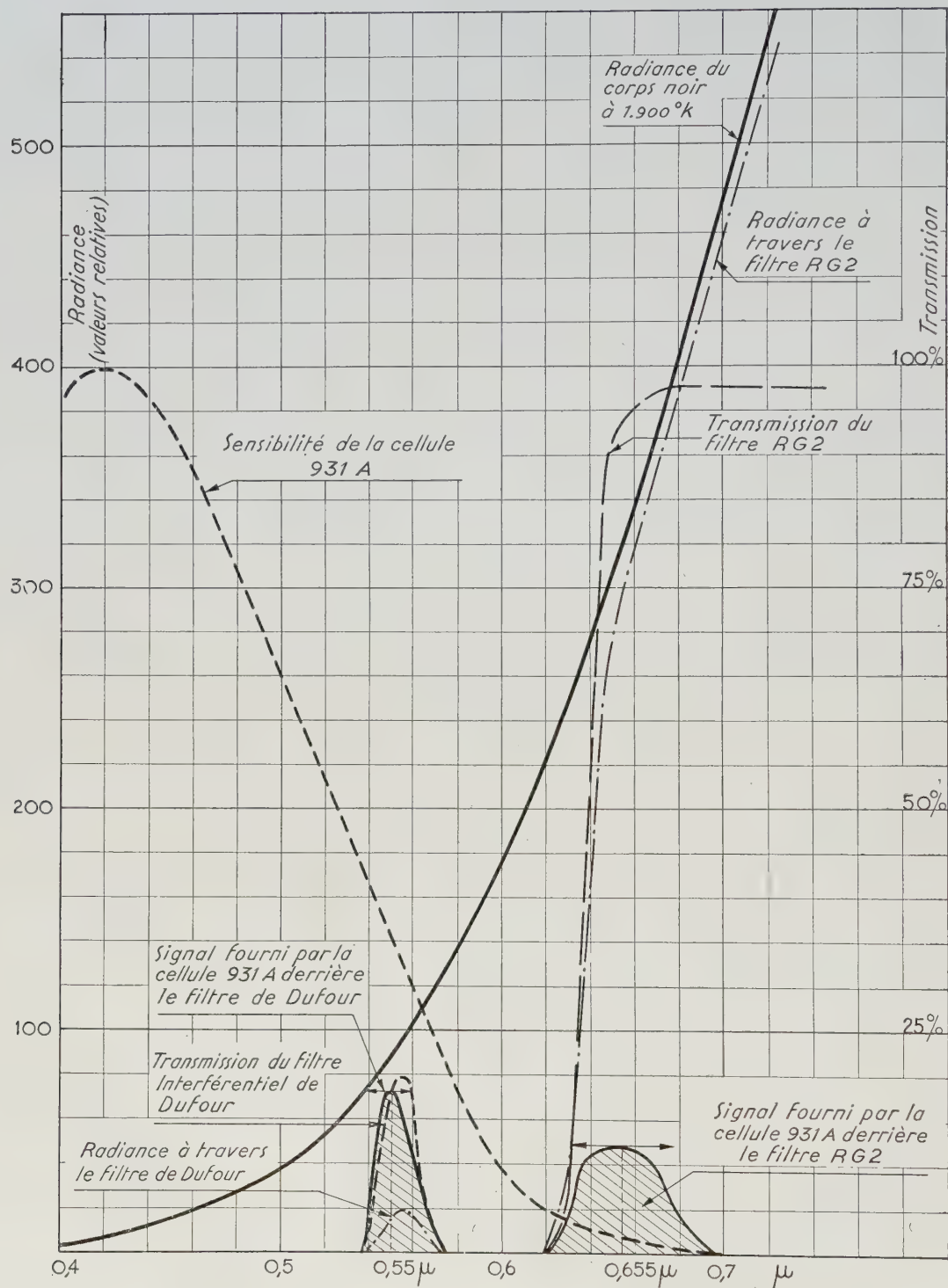


FIG. 3, 7. — Réponse du multiplicateur d'électrons RCA 931A derrière le filtre vert interférentiel et le filtre rouge d'Iéna RG2.

### Utilisation du pyromètre.

L'appareil est placé devant la fenêtre ménagée sur la culasse du moteur, de façon que la lumière émise par la flamme tombe sur l'écran diffusant (fig. 3,7 bis). Chacune des cellules 931 A est alimentée par une batterie de 10 piles type américain de 100 volts, fournissant au total 1 000 volts en 10 étages égaux. Le pôle positif de la

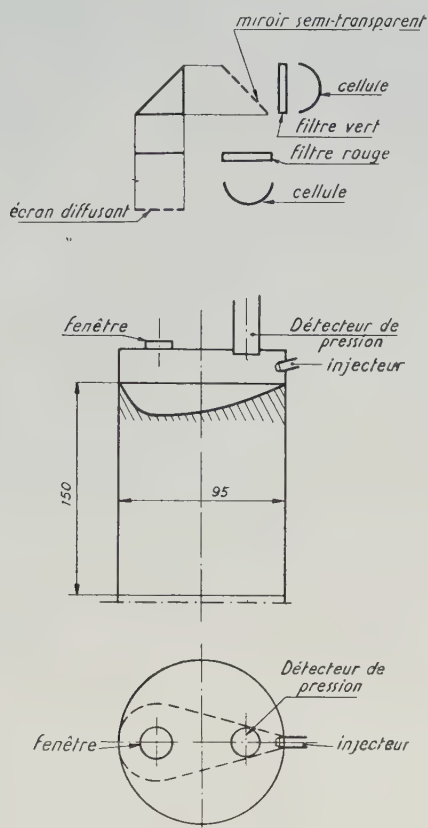


FIG. 3, 7 bis.

batterie de pile est mis à la masse. Les dinodes successives du multiplicateur d'électrons sont reliés à ces différents étages à travers des résistances de 1 M $\Omega$  destinées à limiter le débit. La résistance finale de l'anode est constituée par la résistance de 1 M $\Omega$  joignant l'entrée d'un commutateur Philips GM 4580 à la masse. Ce montage est analogue à celui représenté schématiquement au chapitre II sur la figure 2,13. Chacune des 2 cellules 931 A ainsi alimentée attaque chacune des deux voies du commutateur électronique dont les amplificateurs sont mis hors circuit.

Le commutateur électronique est à son tour relié à un oscillographe Philipps GM 3156. Sur l'écran du tube cathodique apparaissent deux spots déviés verticalement, l'un en fonction du signal fourni par la voie rouge, l'autre en fonction du signal fourni par la voie verte. La tension recueillie aux bornes de la résistance de charge de l'anode de chaque multiplicateur d'électrons suffit dans les conditions de l'expérience pour provoquer une déviation suffisante des spots. Ces spots se déplacent horizontalement en fonction de l'angle de rotation du moteur sous l'action d'un rhéostat à liquide entraîné directement par l'arbre moteur (32).

Les figures obtenues sur le tube cathodique sont photographiées sur film de 35 mm et les négatifs obtenus sont examinés dans un appareil de lecture de micro films. Le rapport entre la figure fournie par l'appareil de lecture de micro-films et l'image fournie par le tube cathodique est fixe et égal à 3,15.

### Étalonnage du pyromètre.

L'étalonnage de l'appareil se fait en l'éclairant au moyen d'une lampe pyrométrique à ruban de tungstène ou au moyen d'un corps noir. Pour des raisons de commodité, nous avons utilisé une lampe à ruban de tungstène.

L'émission spectrale du tungstène n'est pas semblable à celle du corps noir, les brillances

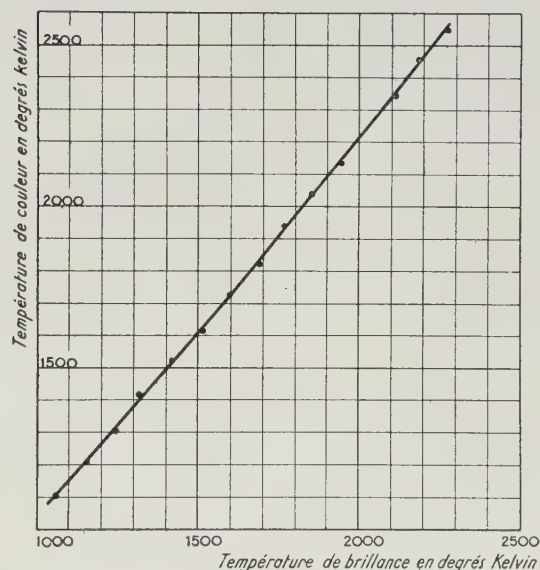


FIG. 3, 8. — Correspondance entre les températures de brillance pour  $\lambda = 0,665 \mu$  et les températures de couleur pour le tungstène.

dans le vert étant relativement plus élevées que dans le bleu et le rouge. Toutefois, les différences sont faibles et n'atteignent que 0,5 % pour une température de couleur rouge bleu de 1 600° K et 1 % pour une température rouge bleu de 2 600° K. (26).

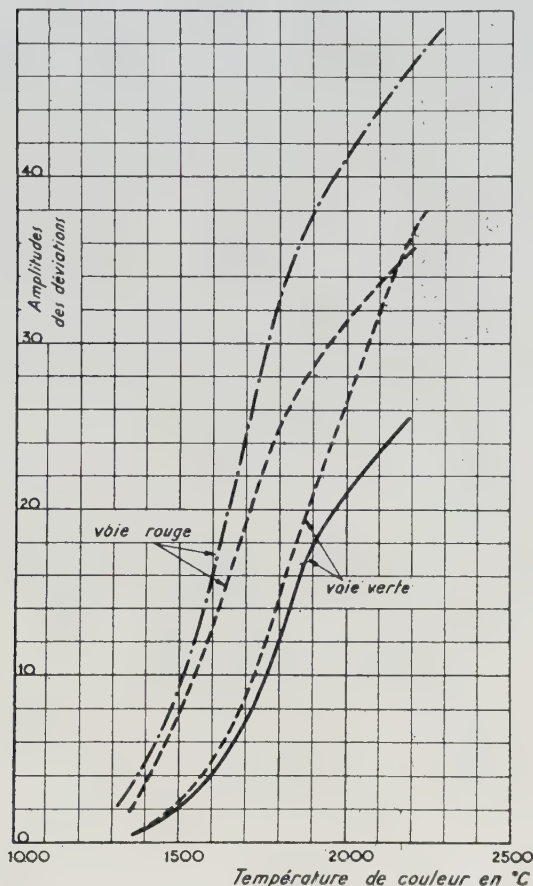


FIG. 3, 9. — Amplitude des déviations relevées sur le tube cathodique lors de l'étalonnage en fonction de la température.

Lors de l'étalonnage, on mesurait la température de brillance du ruban de tungstène au moyen d'un pyromètre optique Ribaud pour la longueur d'onde  $\lambda = 0,665 \mu$ . La courbe de la fig. 3,8 permettait ensuite de passer à la température de couleur rouge bleu correspondante à laquelle on identifiait la température de couleur rouge vert.

Au cours de l'étalonnage, on relevait pour chaque température la déviation de chacun des deux spots correspondant aux deux voies rouge et verte (tableau ci-dessous). L'amplitude de ces déviations varie en fonction de la quantité totale

de lumière reçue par le pyromètre, ainsi que le montre les courbes des figures 3,9 et 3,10. Les courbes de la fig. 3,9 correspondent à des déviations mesurées directement sur le tube cathodique tandis que la courbe de la fig. 3,10 est obtenue après enregistrement photographique. Partant de ces données, on peut tracer point par point la courbe donnant la température de couleur en fonction du rapport des amplitudes vert/rouge (courbe de la fig. 3,11).

Aux environs de 1.900° C, cette courbe présente un point anguleux repéré lors des relevés faits aussi bien par mesure directe sur le tube cathodique que par photographie. Afin d'en mieux saisir la cause, nous avons reporté sur un papier à double division logarithmique les

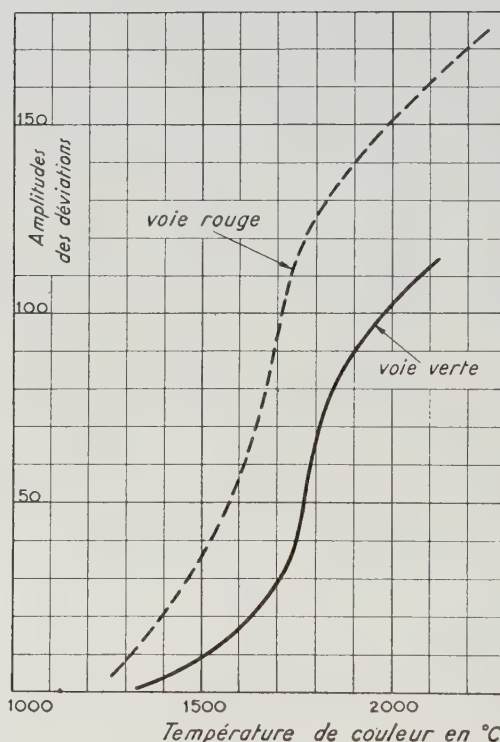


FIG. 3, 10. — Amplitude des déviations relevées par photographie lors de l'étalonnage en fonction de la température.

déviations en fonction de la température pour chacune des voies rouge et verte (courbe de la fig. 3,12). Sur cette figure, il apparaît nettement que la relation entre la déviation lue et la température suit tout d'abord une loi exponentielle, puis une loi toute différente lorsque la déviation atteint une certaine valeur. Cette valeur n'est pas la même pour la voie verte et pour la voie rouge.

Les grandeurs qui apparaissent au numérateur du rapport vert/rouge ne suivent donc plus la même loi à partir d'une température, ce qui explique le rapide changement de pente observé sur la courbe de la fig. 3, 11. Nous retrouvons là le phénomène déjà observé avec le pyromètre monochromatique et auquel nous avons essayé de donner une explication (voir ci-dessus chapitre II 3<sup>e</sup> partie).

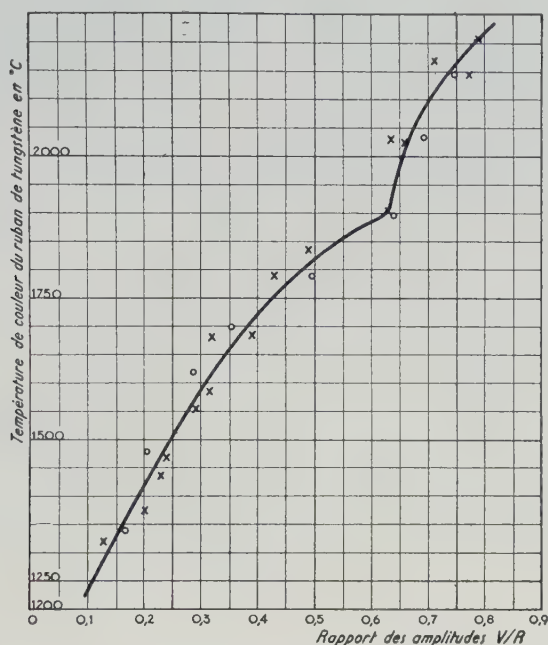


FIG. 3, 11. — Température de couleur du ruban de tungstène en fonction du rapport V/R.

- x Mesure directe sur le tube cathodique.
- o Mesure par enregistrement photographique.

## Résultats expérimentaux.

### Moteur utilisé

Les expériences ont été faites sur un moteur Diesel monocylindrique I. G. à taux de compression variable. Les caractéristiques de ce moteur sont les suivantes : alésage 95 mm, course 150 mm, température d'eau de refroidissement 100°C. Ce moteur est accouplé à un moteur synchrone qui maintient en toutes circonstances sa vitesse de 1.000 t/mn.

L'injection se fait directement dans une chambre ménagée dans le piston lui-même. La culasse porte deux ouvertures placées dans l'axe du jet de gas-oil qui sort de l'injecteur. L'ouverture la plus proche de l'injecteur est utilisée

pour y placer le capteur de pression à membrane équilibrée du manographe strobo-cathodique Vichnievsky grâce auquel on procède au relevé des diagrammes de pression en même temps qu'au relevé des températures de flamme (33).

L'autre ouverture, plus éloignée de l'injecteur, est située au-dessus d'une cavité ménagée dans le piston lui-même et où le jet de gas-oil vient s'épanouir au cours du temps moteur. Cette ouverture est donc utilisée pour porter une fenêtre de silice fondue à travers laquelle le pyromètre peut recevoir le rayonnement de la flamme. Signalons ici que, pour fixer commodément cette fenêtre à son support d'acier, nous avons, après quelques tâtonnements, utilisé des joints d'étanchéité en cuivre rouge recouverts sur chaque face d'une couche de soudure d'étain de 0,8 à 1 mm. (fig. 3, 13). Mise en place sur le moteur, la fenêtre était bloquée progressivement sur son support quand, l'échauffement ayant ramolli la soudure, celle-ci pouvait s'étendre pour venir boucher les moindres interstices. Une fois le blocage réalisé, une telle fenêtre résiste parfaitement aux pressions et températures qui se développent dans le moteur et nous avons en fait réalisé toutes nos expériences avec le même dispositif. D'autres fenêtres ont été décrites par différents auteurs (7) (21) (23).

La fenêtre décrite ici se noircit peu à peu au cours des expériences, de façon lente d'ailleurs lorsqu'elle est chaude. Au cours des expériences, nous avons donc procédé à des nettoyages fréquents.

Au fur et à mesure du dépôt de suie sur la fenêtre, les images relevées sur l'écran du tube cathodique ont une amplitude décroissante, sans que le rapport des énergies reçues à travers les écrans vert et rouge varie sensiblement. Au cours de nos expériences, nous avons mis à profit cette variation lente de l'amplitude des images pour utiliser celles dont la hauteur, pour une température donnée, était voisine de l'amplitude lue sur le tube cathodique lors de l'étalonnage de l'appareil.

Nous avons systématiquement laissé dans quelques cas le dépôt de suie sur la fenêtre devenir anormalement épais. Les images correspondantes sont très petites, et ne permettent qu'une faible précision des mesures. Mais de plus, il nous est apparu que, dans ces conditions, l'absorption est légèrement plus grande dans le vert que dans le rouge, ce qui entraîne une diminution apparente de la température de couleur. Cette remarque met toutefois en valeur la nécessité de surveiller l'état de la fenêtre tout au long des expériences.

**Conditions de fonctionnement du moteur.**

Dans toutes nos expériences, nous avons autant que possible maintenu fixes les conditions

taux de compression du moteur a été fixé à 15,7. Dans ces conditions, nous avons constaté que la combustion n'était pas complète aux fortes charges. Pour éviter un encrassement trop rapide

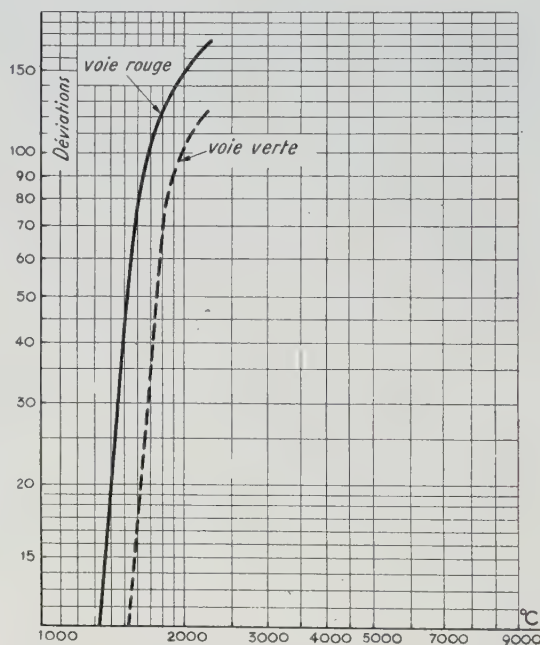
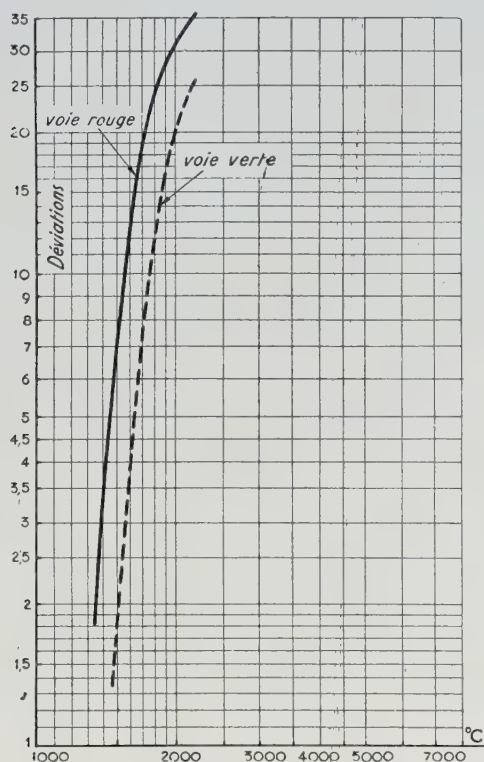


FIG. 3, 12. — Déviations relevées au cours de l'étalonnage en fonction de la température de couleur de la lampe à ruban de tungstène.

A gauche : Mesures directes. A droite : relevé photographique.

de marche du moteur. Le même gas-oil a toujours été utilisé. Son pouvoir calorifique supérieur est de 11 100 cal/g ; sa densité de 0,843 à 14° C.

Pour des raisons de commodité mécanique, le

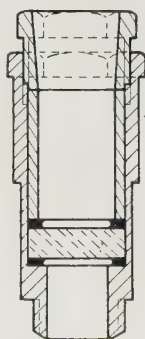


FIG. 3, 13.

de la fenêtre ménagée sur la culasse, nous avons été amenés à ne travailler qu'à charge relativement réduite. Nous avons successivement porté à trois niveaux différents les trois grandeurs suivantes : pression d'air d'admission ; richesse de la charge ; avance à l'injection.

1. La pression d'air d'admission était égale à la pression atmosphérique augmentée de 100, 200 ou 300 g/cm<sup>2</sup>.

2. La richesse a été réglée aux trois valeurs de 0,34, 0,41 et 0,485.

3. L'avance à l'injection était de 12°5, 15° ou 20° avant le point mort haut.

**Enregistrements expérimentaux (Annexe II).**

En opérant dans les conditions décrites ci-dessus, nous avons obtenu un certain nombre de diagrammes, les uns relatifs à la pression, les

*Étalonnage du pyromètre à deux couleurs.*

| AMPÈRES | TEMPÉRAT.<br>BRILLANCE<br>°C | TAMPÉR.<br>COULEUR<br>°C | AMPLITUDES EN MM |      | RAPPORT<br>V/R | OBSERVATIONS                                                                   |
|---------|------------------------------|--------------------------|------------------|------|----------------|--------------------------------------------------------------------------------|
|         |                              |                          | rouge            | vert |                |                                                                                |
| 8,75    | 1 300                        | 1 375                    | 2,5              | 0,5  | 0,2            | Amplitudes de déviations<br>lues directement sur le<br>tube cathodique.        |
| 9,4     | 1 380                        | 1 470                    | 6,3              | 1,5  | 0,238          |                                                                                |
| 10,2    | 1 480                        | 1 585                    | 12               | 3,8  | 0,317          |                                                                                |
| 10,7    | 1 566                        | 1 685                    | 18               | 7    | 0,389          |                                                                                |
| 11,3    | 1 650                        | 1 790                    | 24,5             | 10,5 | 0,428          |                                                                                |
| 12,2    | 1 750                        | 1 905                    | 28,5             | 18   | 0,632          |                                                                                |
| 13,3    | 1 850                        | 2 025                    | 32               | 21   | 0,657          |                                                                                |
| 14,8    | 1 970                        | 2 170                    | 35               | 25   | 0,714          |                                                                                |
| 8,6     | 1 250                        | 1 320                    | 2,3              | 0,3  | 0,130          | Amplitudes de déviations<br>lues directement sur le<br>tube cathodique.        |
| 9,2     | 1 350                        | 1 435                    | 5,7              | 1,3  | 0,228          |                                                                                |
| 9,9     | 1 455                        | 1 555                    | 13               | 3,8  | 0,292          |                                                                                |
| 10,6    | 1 560                        | 1 680                    | 22               | 7    | 0,318          | Déviations lues au lecteur<br>de microfilm après pho-<br>tographies des spots. |
| 11,5    | 1 690                        | 1 835                    | 34,5             | 17   | 0,493          |                                                                                |
| 12,8    | 1 860                        | 2 035                    | 42               | 26,5 | 0,632          |                                                                                |
| 14,1    | 1 950                        | 2 145                    | 45               | 34,5 | 0,772          |                                                                                |
| 15,3    | 2 000                        | 2 210                    | 47               | 37   | 0,787          |                                                                                |
| 8,8     | 1 270                        | 1 340                    | 12               | 2    | 0,167          |                                                                                |
| 9,5     | 1 390                        | 1 480                    | 34               | 7    | 0,206          |                                                                                |
| 10,3    | 1 510                        | 1 620                    | 67               | 19   | 0,284          |                                                                                |
| 11,4    | 1 650                        | 1 790                    | 123              | 61   | 0,496          |                                                                                |
| 12,4    | 1 740                        | 1 895                    | 138              | 88   | 0,638          |                                                                                |
| 13,5    | 1 860                        | 2 035                    | 153              | 106  | 0,693          |                                                                                |
| 14,7    | 1 950                        | 2 145                    | 165              | 123  | 0,746          |                                                                                |
| 15,7    | 2 040                        | 2 260                    | 175              | 120  | 0,687          |                                                                                |
| 10,6    | 1 575                        | 1 700                    | 79               | 28   | 0,354          |                                                                                |

autres relatifs à la température, les uns et les autres développés en fonction de l'angle de rotation. Ces diagrammes correspondent à 3 groupes d'expériences. Quelques-unes des photographies prises pendant ces expériences sont reproduites en annexe II. Les figures 3,14 et 3,15 donnent un exemple de l'agrandissement de ces photographies dans l'appareil à lecture de microfilms. Toutes les mesures ont été effectuées sur de tels agrandissements.

La fig. 3,14 est un enregistrement de pression en fonction de l'angle de rotation. Les lignes horizontales représentent l'étalonnage de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> réalisé pendant la prise même du diagramme. La fig. 3,15 est l'agrandissement d'un enregistrement de température en fonction de l'angle de rotation. Des deux courbes représentant l'émission reçue à travers les filtres vert et rouge, on tire, en faisant point par point le rapport des amplitudes et en s'appuyant sur la courbe d'étalonnage 3,11, le tracé de la température en fonction de l'angle de rotation (courbe du bas de la fig. 3,15).

1<sup>er</sup> groupe d'enregistrements : la variable est la pression d'admission d'air.

Les photographies 1, 2, 3 et 4 correspondent à une pression d'admission de 1,1 kg/cm<sup>2</sup>; la richesse du mélange est de 0,48, et l'avance à l'injection de 13°.

Les photographies 5, 6, 7 et 8 correspondent à une pression d'admission de 1,2 kg/cm<sup>2</sup>; la richesse du mélange est de 0,435 et l'avance à l'injection de 13°.

Les photographies 9, 10, 11 et 12 correspondent à une pression d'admission de 1,3 kg/cm<sup>2</sup>; la richesse est de 0,40 et l'avance à l'injection de 13°.

Remarquons que dans ces expériences destinées à mettre en relief l'influence de la pression d'admission, la richesse a également varié d'environ 15 %. Nous avons pensé en effet qu'il était préférable de ne pas changer le débit de gas-oil pour assurer, dans toute la mesure du possible, une pulvérisation identique dans la chambre de combustion au cours de ces 3 expériences.

2<sup>e</sup> groupe d'enregistrement : la variable est la richesse.

Les photographies 13, 14, 15 et 16 correspondent à la richesse 0,34.

Les photographies 17 à 22 correspondent à la richesse 0,41.

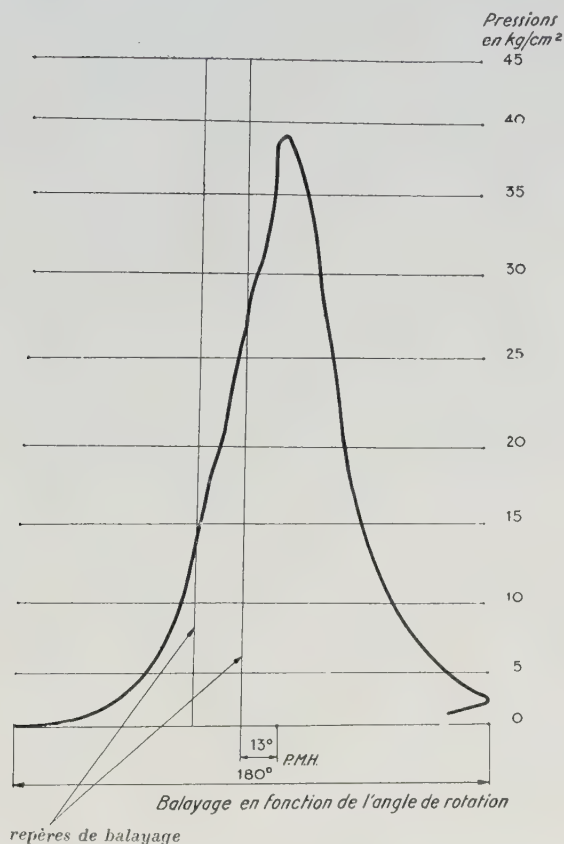


FIG. 3, 14. — Exemple de relevé de pression.

Conditions de fonctionnement

- Taux de compression 15,7.
- Pression de suralimentation 300 g/cm<sup>2</sup>.
- Avance à l'injection 13°
- Richesse 0,34.

Les photographies 23 à 27 correspondent à la richesse 0,485.

Dans ces trois expériences, la pression d'admission a été maintenue égale à 1,3 kg/cm<sup>2</sup> et l'avance à l'injection égale à 13°.

3<sup>e</sup> groupe d'enregistrement : la variable est l'avance à l'injection.

Les photographies 28 à 32 correspondent à 12,5° d'avance.

Les photographies 33 à 37 correspondent à 15° d'avance.

Les photographies 38 à 42 correspondent à 20° d'avance.

Ces diagrammes appellent quelques remarques :

1<sup>o</sup> Compte tenu de l'épaisseur du spot du tube cathodique, les pressions ont été mesurées à 0,3 ou 0,4 kg/cm<sup>2</sup> près. En ce qui concerne le rayonnement, la précision dépend surtout de l'amplitude du déplacement du spot correspondant à la voie verte, amplitude plus petite que pour la voie rouge. Il en résulte que la précision est maximum au moment du maximum d'émission de la flamme. Ce maximum d'émission correspond le plus souvent à la plus haute température de couleur repérée dans le cycle. A ce moment, l'erreur sur le déplacement du spot de la voie verte est de l'ordre de 5 à 6 %. L'erreur pour la voie rouge n'est alors que de l'ordre de 3 %. Il en résulte une erreur globale de 8 à 9 % sur le rapport de ces deux termes, ce qui, sur la courbe d'étalonnage 3,11 correspond pour des températures de 1 700 à 1 800° C à une incer-

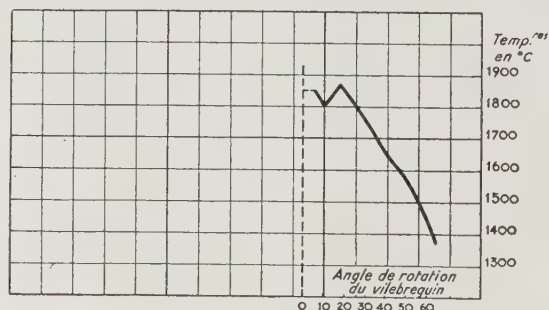
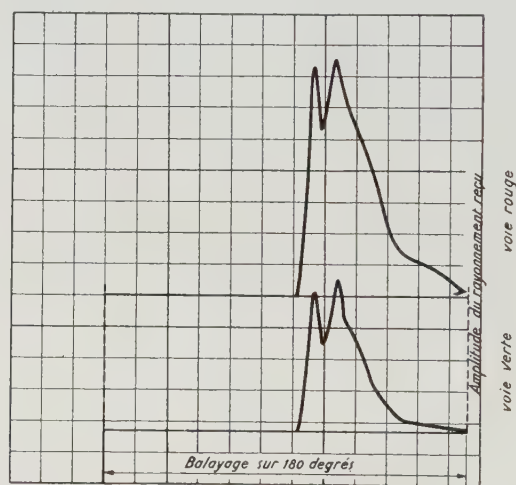


FIG. 3, 15. — Exemple de relevé de température.

En bas : courbe des températures déduite des courbes enregistrées au-dessus.

titude de 40 à 50° C. Cette incertitude est de peu supérieure à la dispersion des points expérimentaux ayant permis l'établissement de la courbe d'étalonnage elle-même.

2° D'un cycle à l'autre, la quantité de lumière reçue par le pyromètre est très variable. Les photographies 19, 20, 21 et 22 du deuxième groupe d'enregistrements ont été prises successivement, soit à 20 ou 30 secondes d'intervalle. D'une figure à l'autre, les courbes représentatives de l'énergie reçue, tant à travers le filtre rouge qu'à travers le filtre vert, sont très différentes. Cependant, les courbes de températures qui en ont été déduites sont relativement très homogènes. En particulier, la température maximum atteinte est dans ces quatre cas comprise entre 1 670° et 1 700° C.

3° La photographie n° 35 correspond à une fenêtre notablement encrassée (3<sup>e</sup> groupe d'enregistrements). Elle est donnée à titre indicatif pour montrer la nécessité des nettoyages fréquents de cette fenêtre.

#### Résultats de mesure.

Les enregistrements décrits ci-dessus permettent donc de connaître simultanément, dans le cas des réglages considérés du moteur, la valeur de la pression et de la température en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin.

R. VICHNIEVSKY et B. SALÉ (36) ont décrit des diagrammes S-Log V où l'entropie des gaz brûlés est portée en abscisse, tandis qu'en ordonnée sont portés les volumes spécifiques de ces gaz. Sur ces diagrammes apparaissent d'une part, le réseau des isobares et d'autre part le réseau des isothermes.

Nos expériences nous fournissaient en fonction de l'angle de rotation les valeurs de la pression et de la température. Il est facile de rapporter ces deux données expérimentales, pression et température, au volume spécifique de la charge évoluant dans le cylindre du moteur afin de pouvoir représenter les phénomènes sur les diagrammes S-Log V. Les fig. 3,16, 3,17 et 3,18 représentent les résultats obtenus de cette façon.

Si les produits de combustion du gas-oil étaient à tout moment en équilibre thermique dans le cylindre du moteur, les groupes de valeurs correspondantes Log V-pression et Log V-température seraient représentés par une courbe unique. Un simple regard sur les fig. 3,16, 3,17, et 3,18 montre immédiatement que les températures moyennes de la charge qui pourraient être calculées à partir des pressions mesurées sont toujours très inférieures aux températures mesu-

rées directement. La différence au début de la combustion est de 1 000° à 1 200°. Elle décroît toutefois au fur et à mesure que la combustion progresse pour n'être, au moment où la flamme disparaît, que de 500° à 800°.

La constatation de tels écarts conduit à en chercher une explication valable. Tout d'abord est-il correct de porter des points représentant l'évolution d'une combustion sur un diagramme établi en fonction des caractéristiques des produits finals de cette combustion et ce, d'autant plus que les différents résultats ont tous été représentés sur un unique diagramme correspondant à la richesse 0,4. Les auteurs de ces diagrammes ont pu affirmer que cette méthode était tout à fait justifiée. Les diagrammes se déforment très lentement en fonction de la richesse et d'autant moins que les produits de la combustion totale sont dilués dans plus d'air. Mais même pour des mélanges riches, le nombre de molécules inertes reste grand vis-à-vis du nombre des molécules en évolution. L'usage de ces diagrammes est donc justifié pendant toute la durée de la combustion.

En second lieu, il faut tenir compte du fait que la température mesurée ici est une température de couleur et non la température vraie de la flamme. La décroissance du pouvoir émissif d'une flamme lumineuse en fonction de la longueur d'onde, telle que l'indique l'équation [4] que nous rappelons ici :

$$\varepsilon_{\lambda} = 1 - e^{-kL/\lambda^2}$$

a pour conséquence une décroissance de la température de brillance en fonction de la longueur d'onde. Il en résulte que la température de couleur est supérieure à la température vraie de la flamme. Cherchons à chiffrer, dans le cas du Diesel qui est traité ici, cette différence dont on connaît donc le sens. Notre appareil ne nous fournit que le rapport des brillances de la flamme dans le vert et le rouge, et non leur valeur absolue. Nous ne pouvons pas par conséquent appliquer la méthode proposée par HOTTEL et BROUGHTON. Assimilons donc la flamme due à la combustion du gas-oil à celle fournie par l'acétate d'amyle dans l'étalon Hefner. On trouve dans les ouvrages classiques (26) les données suivantes concernant l'étalon Hefner :

température vraie de la flamme : 1 675 °K

facteur d'absorption, en fonction de la longueur d'onde :

$$\varepsilon_{\lambda} = 0,0820 \lambda^{-1,4} \quad (\lambda \text{ en microns})$$

Il en résulte pour les deux longueurs d'onde

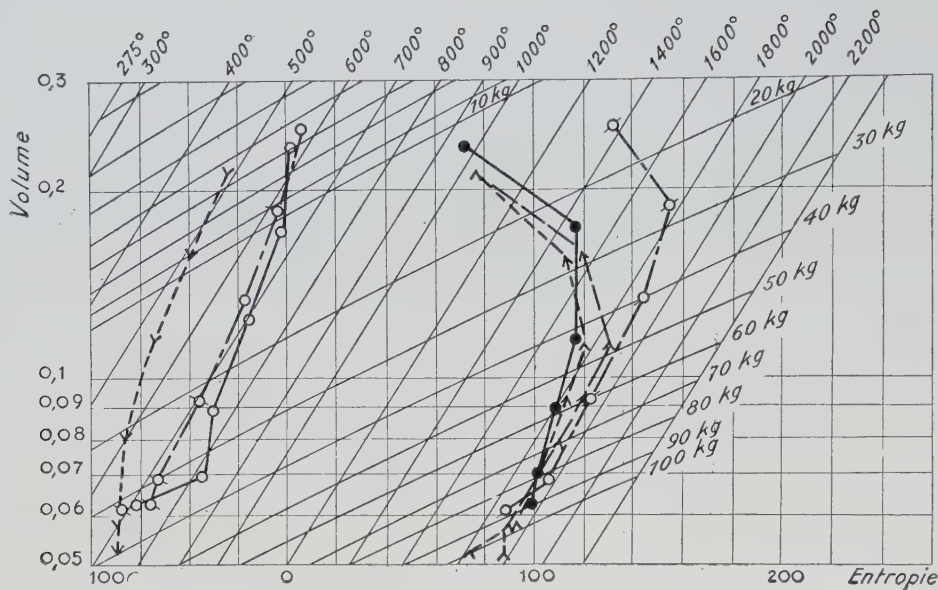


FIG. 3, 16. — Diagramme S-log V des produits de combustion dans l'air d'une essence de

composition  $\left\{ \begin{array}{l} \text{carbone : } 85,62 \% \\ \text{hydrogène : } 14,38 \% \end{array} \right.$

Moteur Diesel I. G.

Variable : la pression d'admission.

|       |              |                                                                                                                                   |
|-------|--------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| v---v | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Pression de suralimentation } 300 \text{ g/cm}^2. \\ \text{Richesse } 0,405. \end{array} \right.$ |
| ^---^ | Températures |                                                                                                                                   |
| o---o | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Pression de suralimentation } 200 \text{ g/cm}^2. \\ \text{Richesse } 0,43. \end{array} \right.$  |
| ●---● | Températures |                                                                                                                                   |
| ⊗---⊗ | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Pressions de suralimentation } 100 \text{ g/cm}^2. \\ \text{Richesse } 0,48. \end{array} \right.$ |
| ⊗---⊗ | Températures |                                                                                                                                   |

FIG. 3, 17. — Diagramme S-log V de la même essence que ci-dessus.

Moteur Diesel I. G.

Pression de suralimentation  $300 \text{ g/cm}^2$ .

Avance à l'injection  $13^\circ$ .

Variable : la richesse.

|       |              |                                                                       |
|-------|--------------|-----------------------------------------------------------------------|
| o---o | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Richesse } 0,34 \end{array} \right.$  |
| ●---● | Températures |                                                                       |
| v---v | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Richesse } 0,41 \end{array} \right.$  |
| ^---^ | Températures |                                                                       |
| x---x | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Richesse } 0,485 \end{array} \right.$ |
| Δ---Δ | Températures |                                                                       |

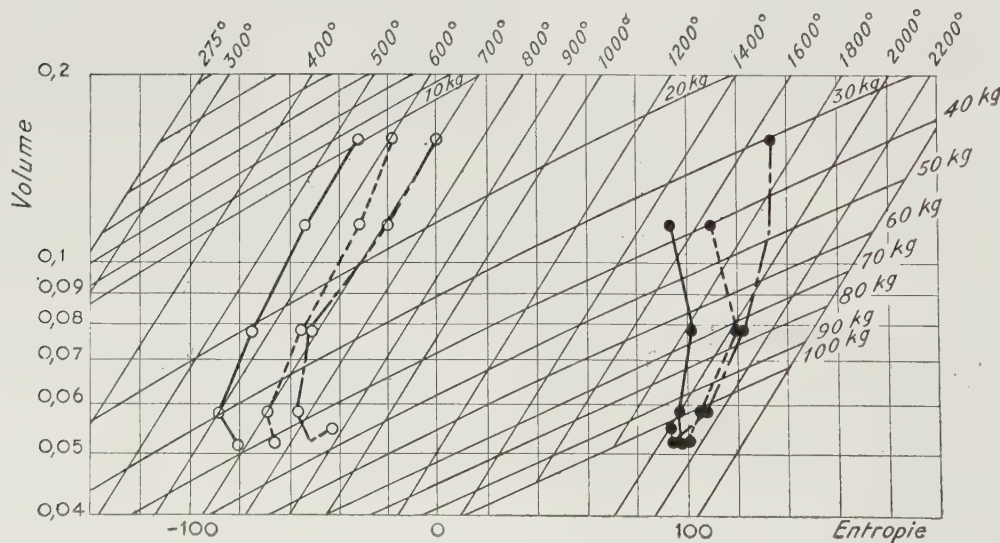
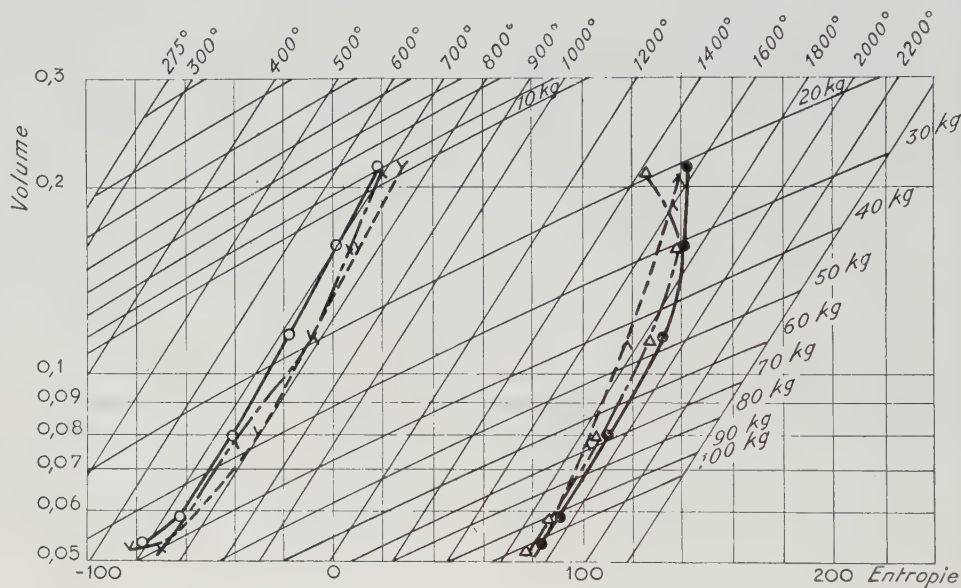


FIG. 3, 18. — Diagramme S-log V de la même essence que ci-dessus.

Moteur Diesel I. G.

Taux de compression  $15,7$ .

Pression de suralimentation  $300 \text{ g/cm}^2$ .

Variable : l'avance à l'injection.

|       |              |                                                                          |
|-------|--------------|--------------------------------------------------------------------------|
| o---o | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Avance } 12,5^\circ \end{array} \right.$ |
| ●---● | Températures |                                                                          |
| o---o | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Avance } 15^\circ \end{array} \right.$   |
| ●---● | Températures |                                                                          |
| o---o | Pressions    | $\left\{ \begin{array}{l} \text{Avance } 20^\circ \end{array} \right.$   |
| ●---● | Températures |                                                                          |

du pyromètre  $\lambda_R = 0,655 \mu$  et  $\lambda_V = 0,55 \mu$  les valeurs des pouvoirs émissifs de la flamme

$$\varepsilon_R = 0,150 \quad \text{et} \quad \varepsilon_V = 0,19.$$

En nous reportant à la définition de la température de couleur, nous pouvons écrire que le rapport des brillances ( $b_\lambda$ ) de la flamme à la température vraie  $\theta$  dans le vert et dans le rouge est égal au rapport des brillances ( $b_{\lambda_0}$ ) du corps noir à la température de couleur  $T$  de la flamme :

$$\frac{b_{V\theta}}{b_{R\theta}} = \frac{b_{VT}}{b_{RT}} \quad [8]$$

L'application de la loi de Wien donne immédiatement :

$$\frac{\varepsilon_V e^{-C_2/\lambda_V \theta}}{\varepsilon_R e^{-C_2/\lambda_R \theta}} = \frac{e^{-C_2/\lambda_V T}}{e^{-C_2/\lambda_R T}} \quad [9]$$

Il en résulte :

$$\frac{1}{\theta} - \frac{1}{T} = \frac{\log \frac{\varepsilon_V}{\varepsilon_R}}{C_2 \left( \frac{1}{\lambda_V} - \frac{1}{\lambda_R} \right)} \quad [10]$$

La formule [10] nous permet de calculer la température de couleur rouge vert de cette flamme en la supposant vue par le pyromètre utilisé. Le calcul donne  $T = 1850^\circ \text{K}$ . La température de couleur excède la température vraie de  $175^\circ$ .

Au point mort haut (P. M. H.) l'épaisseur de la flamme dans le Diesel est de l'ordre de 1 cm, c'est-à-dire assez voisine de l'épaisseur de l'éta lon Hefner. On peut en conclure que la température de couleur considérée ci-dessus excède de moins de  $200^\circ$  la température vraie au P. M. H. ;  $30^\circ$  après le P. M. H., l'épaisseur de la flamme est de l'ordre de 3 cm ; il y correspond une différence entre la température de couleur et la température vraie de l'ordre de  $150^\circ$ . Pour  $40^\circ$  après le P. M. H., cet excédent tombe à moins de  $120^\circ$  pour une flamme d'environ 4 cm d'épaisseur.

Ces écarts sont toujours très inférieurs à ceux relevés sur les diagrammes S-Log V, même lorsque l'épaisseur de la flamme est faible, au début de la combustion.

Il semble donc tout à fait raisonnable d'attribuer les écarts apparaissant entre les deux familles de courbes à l'existence, au sein de la masse gazeuse évoluant dans le cylindre du moteur, d'un fort gradient de température qui se maintient en dépit de la turbulence. La

mesure de la température est locale et ne porte que sur les parties de la masse gazeuse en réaction. La mesure de la pression fournit, au moins dans une combustion normale, une caractéristique moyenne de l'ensemble de la charge. Toute expression de la température déduite de cette mesure ne saurait donc avoir de signification physique que si l'équilibre thermodynamique est réalisé.

Afin de contrôler nos résultats, nous avons porté sur les mêmes graphiques S-Log V des résultats obtenus par MYERS et UYEHARA et présentés dans leur seconde publication (réf. n° 35-2). Il s'agit également de résultats obtenus avec un même gas-oil sur un monocylindre Diesel à préchambre et à 4 temps. L'alésage du moteur est de 108 mm (4 1/4') et la course de 152 mm (6'). Le taux de compression est maintenu égal à 14,5 et la vitesse de rotation à 1.200 t/m. Leurs résultats les plus intéressants sont ceux qui concernent l'influence de la richesse. Les courbes (\*) que nous présentons sur les fig. 3,19, 3,20 et 3,21 correspondent aux richesses de 0,58, 0,93 et 1,02. Notons que ces deux dernières valeurs sont tout à fait exceptionnelles dans la marche en Diesel où la combustion, pour être satisfaisante, nécessite toujours un excès d'air de 20 à 25 %.

Un simple examen de ces courbes révèle immédiatement que les écarts à l'équilibre observés dans nos propres expériences se retrouvent ici pour la richesse 0,58 qui est du même ordre que les richesses que nous avons utilisées. Par contre, les deux familles de courbes se rejoignent au cours de la combustion pour les mélanges les plus riches. Il semble donc qu'en présence d'une grande quantité de gas-oil, tout l'air contenu initialement dans la charge participe à la combustion, les gaz brûlés atteignant alors sensiblement un état d'équilibre thermodynamique. L'obtention de cet équilibre est encore facilitée par la présence d'une préchambre qui assure un brassage énergique des gaz.

En second lieu, il est remarquable que le début de la combustion du gas-oil s'effectue à une température très sensiblement constante voisine dans nos expériences de  $2000^\circ \text{K}$ . La plus grande partie de la combustion s'effectue ensuite à une température décroissant très lentement. Les conditions extérieures qui pour-

(\*) Les graphiques utilisés ici représentent l'entropie en fonction de la pression. Vis-à-vis des graphiques précédents, les rôles de la pression et du volume sont simplement inversés et la concavité des courbes représentant l'évolution de la charge est tournée vers le bas au lieu de l'être vers le haut. Voir VICHNIEVSKY et SALÉ.

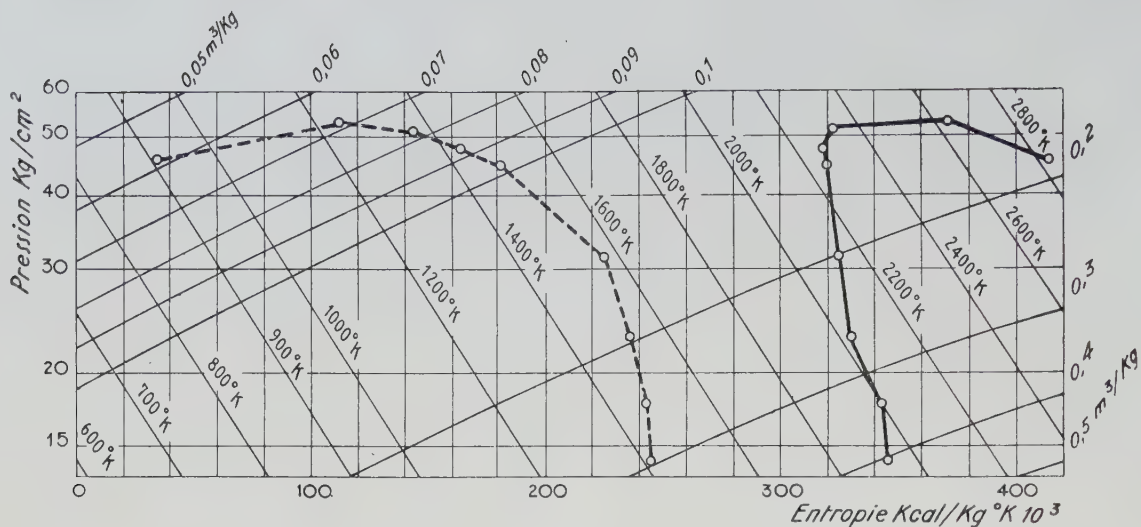


FIG. 3, 19. — Transcription des résultats de O. A. UYEHARA, de P. S. MYERS, K. M. WATSON, L. A. WILSON  
(A. S. M. E. Trans., juil. 1947, p. 474, fig. 24).

Richesse 0,58    o--o Courbe tirée des mesures de pression    o—o Courbe tirée des mesures de température.

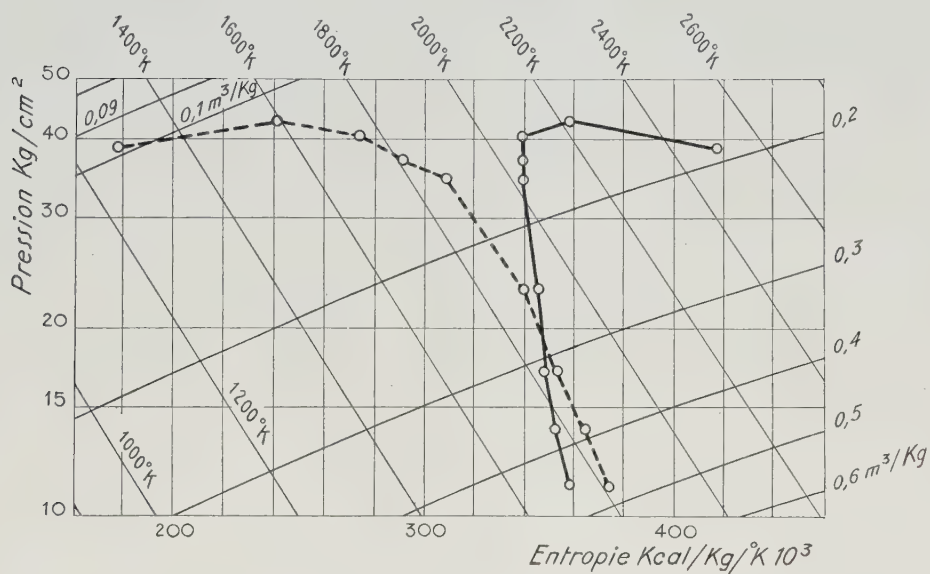


FIG. 3, 20. — Transcription des résultats des mêmes auteurs  
(A. S. M. E. Trans., juil. 1947, p. 474, fig. 25).

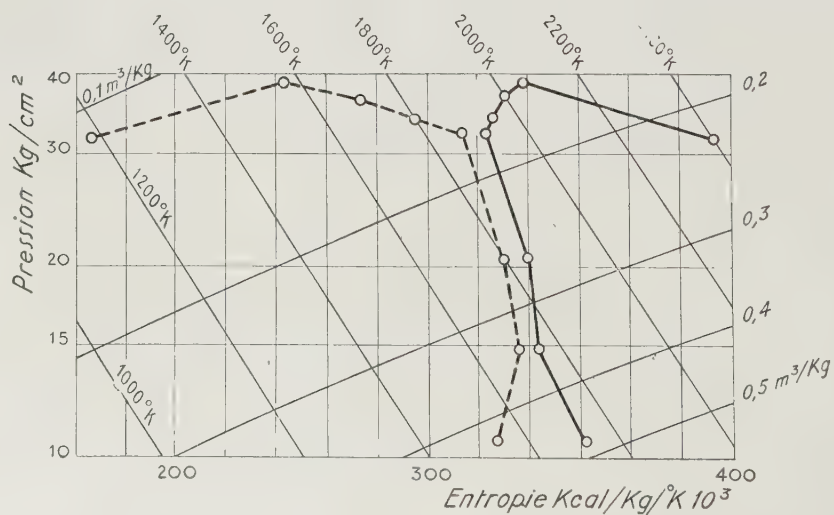
Richesse 0,93.

o--o Courbe tirée des mesures de pression.  
o—o Courbe tirée des mesures de température.

FIG. 3, 21. — Transcription des résultats des mêmes auteurs  
(A. S. M. E. Trans., juil. 1947, p. 474, fig. 26).

Richesse 1,02.

o--o Courbe tirée des mesures de pression.  
o—o Courbe tirée des mesures de température.



tant variaient d'un groupe d'expériences à un autre, ont donc une influence négligeable. L'effet même de la combustion d'une partie de la charge sur l'évolution de la partie non brûlée est peu sensible.

D'autres auteurs tels que SCHROEDER (30 bis), UYEHARA et MYERS (35), LANDEN (20) ont déjà remarqué cette indépendance de la température de combustion vis-à-vis des conditions extérieures. A partir de ces remarques, il a été déduit (37) que les gouttelettes de combustible liquide qui s'enflamment au contact de l'air chaud brûlent en phase vapeur et toujours de la même façon. En effet du centre de la gouttelette vers l'extérieur, la concentration en carburant varie progressivement de l'unité à zéro, tandis que la concentration de l'air comburant suit une loi inverse. La flamme qui apparaît lors de l'inflammation de la gouttelette prend son origine dans une zone comprise entre les limites supérieure et inférieure d'inflammabilité, compte tenu des conditions de température et de pression qui règnent autour de la gouttelette.

Vers l'extérieur, la flamme ne peut se propager longtemps, faute de carburant. Vers l'intérieur au contraire, elle peut progresser jusqu'à la zone correspondant à la limite supérieure d'inflammabilité du mélange air-carburant. Par distillation progressive du liquide, la combustion se poursuivrait ainsi dans des conditions constantes auxquelles correspondrait par conséquent une température de combustion constante.

Pour étayer cette hypothèse, nous avons cherché par le calcul la richesse à laquelle doit se produire la combustion d'une molécule d'hexadécane pour fournir une température de  $1950^{\circ}\text{K}$  égale à la température relevée le plus souvent dans nos expériences. Ce calcul a été fait en supposant que tout le carbone passe à l'état d'oxyde de carbone et l'hydrogène à l'état d'eau dans la mesure où il reste de l'oxygène disponible. Ceci ne rend pas compte de l'apparition transitoire de particules de carbone dans la flamme, mais elle permet d'obtenir cependant une image du mécanisme de la combustion. Dans ces conditions, il est aisé de calculer que la température de  $1950^{\circ}\text{K}$  correspond à une combustion réalisée à une richesse de 1,7 c'est-à-dire avec un défaut d'air de 40 %.

Le relevé des températures de flammes dans les moteurs Diesel nous a également incité à calculer, au moins de façon approchée, la richesse à laquelle devait se produire la combustion des hydrocarbures lourds dans les foyers industriels. Nous utiliserons ici les températures mesurées au moyen du pyromètre monochromatique à cel-

lule décrit plus haut (voir chapitre II). En partant des mêmes hypothèses que ci-dessus et en choisissant encore l'hexadécane comme type de molécules contenues dans ces fuels, nous avons trouvé que la température de  $1850^{\circ}\text{K}$  observée dans un four expérimental correspondrait à une combustion en présence d'un défaut d'air de 33 % (soit une richesse du mélange égale à 1,5). Rappelons que les expériences dont on fait ici état étaient faites sans préchauffage de l'air de combustion tandis que, dans le moteur Diesel décrit ci-dessus, le gas-oil est injecté dans l'air porté à plus de  $500^{\circ}\text{C}$  par compression. Cette dernière remarque permet d'expliquer l'élargissement du domaine d'inflammabilité observé dans le moteur Diesel.

La connaissance des températures de la flamme nous a également incité à essayer d'évaluer l'énergie rayonnée par les gaz vers les parois du moteur. Faute de pouvoir mesurer le pouvoir émissif total de la flamme, nous avons simplement calculé une limite supérieure moyennant les hypothèses assez grossières suivantes :

1<sup>o</sup> La combustion du gas-oil a été supposée s'effectuer en présence de la quantité d'air théoriquement nécessaire (mélange stœchiométrique)

2<sup>o</sup> Les gaz brûlés ont été supposés rayonner comme un corps noir, le volume qu'ils occupent étant assimilé à une sphère.

3<sup>o</sup> La loi de combustion du gas-oil en fonction de l'angle de rotation a été déduite de la comparaison de la détente du gaz avec et sans injection de gas-oil (méthode de Neumann) (24).

Dans ces conditions, et pour la richesse 0,435, nous avons obtenu les résultats suivants groupés dans le tableau ci-dessous.

La flamme, dans l'expérience citée, reste apparente pendant  $56^{\circ}$  de rotation du vilebrequin. Pendant toute cette période, les pertes thermiques calculées s'élèvent à 200 calories, dont certainement moins de 8 sont dues au rayonnement. Ce dernier chiffre vient étayer, s'il en était besoin, la conviction des constructeurs de moteurs à combustion interne que le rayonnement est parfaitement négligeable dans le mécanisme d'écoulement de la chaleur vers les parois.

Les considérations précédentes fournissent quelques exemples de l'intérêt que présente, dans l'étude du moteur, la mesure quasi instantanée des températures de flammes. La pyrométrie à deux couleurs, qui permet dans une large mesure d'éliminer l'influence de la transmission des glaces de regard, trouve là un domaine d'application qu'il semble difficile de lui disputer.

| POSITION DU VILEBREQUIN  | TEMPÉRATURE EN °K |           | MOYENNE DÉDUITE DE LA PRESSION | PERTES THERMIQUES CALCULÉES EN CALORIES | RAYONNEMENT CALCULÉ EN CALORIES | TRAVAIL MÉCANIQUE FOURNI EN CALORIES |
|--------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------|-----------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|
|                          | gaz brûlés        | gaz frais |                                |                                         |                                 |                                      |
| 6° avant le P. M. H..... | —                 | 615       | 615                            |                                         |                                 |                                      |
| P. M. H.....             | I 835             | 645       | 680                            | 2,6                                     | 0,1                             | 0,1                                  |
| 4° .....                 | I 950             | 662       | 790                            | 3,8                                     | 0,2                             | 0,3                                  |
| 10 .....                 | I 960             | 643       | 760                            | 11                                      | 0,5                             | 1,5                                  |
| 20 .....                 | I 910             | 582       | 730                            | 32,7                                    | 1,3                             | 7                                    |
| 30 .....                 | I 760             | 518       | 715                            | 64,9                                    | 2,3                             | 11,5                                 |
| 40 .....                 | I 470             | 464       | 707                            | 91,2                                    | 2,3                             | 12,2                                 |
| 50 .....                 | I 020 (*)         | 412       | 575                            | — 5,8                                   | 1,2                             | 10,6                                 |

(\*) Valeur extrapolée sur la courbe expérimentale.

### Résumé et conclusions.

Au début de cette étude, nous avons rappelé le rôle des particules de suie en suspension dans les flammes éclairantes en ce qui concerne le rayonnement. Le calcul de SCHACK qui fait apparaître la très faible valeur de la différence de température entre gaz et particules a été résumé. Une évaluation plus simple de cette différence de température a été proposée.

Nous avons ensuite décrit un pyromètre à cellule photo-électrique susceptible de mesurer les températures de brillance le long d'une flamme de diffusion de grandes dimensions et d'en suivre les fluctuations les plus rapides. Un appareil modifié dérivé du précédent ne présente qu'une très faible ouverture ; il permet de mettre en œuvre la méthode de Kurlbaum. Des résultats d'expériences sur la flamme du four expérimental d'IJmuiden sont donnés. Quelques conclusions en ont été tirées sur l'influence de diverses variables : débit de fuel, nature et débit du fluide d'atomisation. Par ailleurs, l'amplitude et la vitesse des fluctuations de température ont été repérées tout le long de la flamme. Ces fluctuations sont plus importantes et surtout beaucoup plus rapides au voisinage du brûleur que dans le reste de la flamme. Elles semblent liées au régime d'écoulement des gaz.

Les résultats obtenus par la méthode de Kurlbaum font ressortir une corrélation assez étroite entre le pouvoir émissif et la température vraie au cours des fluctuations : plus le pouvoir émissif est faible, et plus la température est élevée.

Il conviendrait d'augmenter le nombre d'expériences pour confirmer cette observation.

Un dernier chapitre traite ensuite de l'application de la pyrométrie à deux couleurs à l'étude de la combustion dans le moteur Diesel. Un pyromètre à cellules photo-électriques fonctionnant dans le vert et dans le rouge permet de suivre les variations de température de la flamme qui se développe dans la chambre de combustion d'un moteur Diesel. Les résultats acquis grâce à cet appareil recoupent de façon satisfaisante certains travaux américains. Il apparaît surtout que l'équilibre thermique n'est réalisé à aucun moment au cours du cycle, sauf dans le cas particulier d'un rapport air-carburant voisin du mélange stoechiométrique. Le fonctionnement d'un moteur Diesel dans de telles conditions est tout à fait exceptionnel et entraîne toujours à l'échappement l'apparition d'une fumée très dense. Il est par ailleurs tout à fait remarquable que la température initiale de combustion ne semble, pour un gas-oil donné, dépendre d'aucune des variables que nous avons étudiées : richesse, pression de suralimentation et avance à l'injection.

Enfin, à partir des mesures de températures effectuées sur le moteur, il a été possible de montrer que, dans les échanges thermiques entre les gaz et les parois de la chambre de combustion, le rayonnement ne pouvait jouer qu'un rôle très restreint.

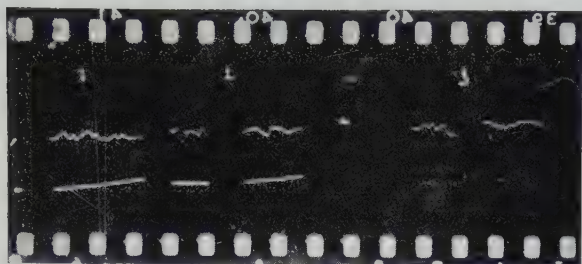
*Manuscrit reçu le 4 juin 1954.*

# ANNEXE I

## Expérience I.

## PLANCHE I

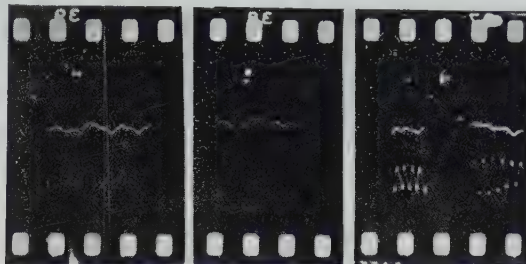
Température à 1,80 m du brûleur.



1

2

3



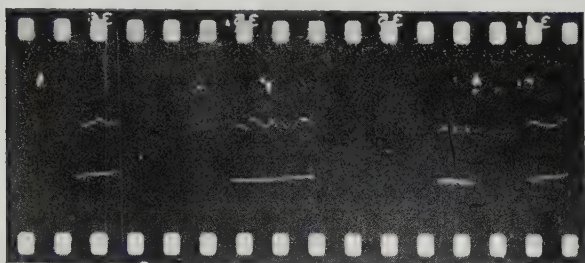
4

5

6



Photographies 1 à 6 : Visée sur la partie supérieure de la flamme.  
(Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)

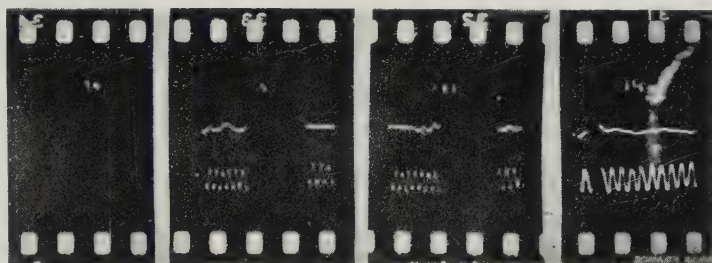


7

8

9

10



11

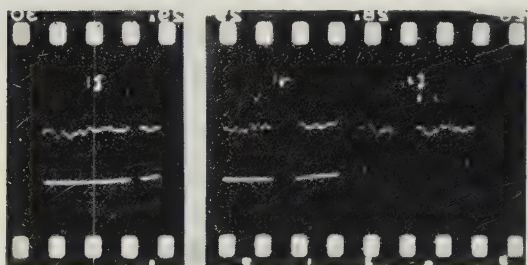
12

13

14

Photographies 7 à 14 : Visée sur le milieu de la flamme.  
(Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)

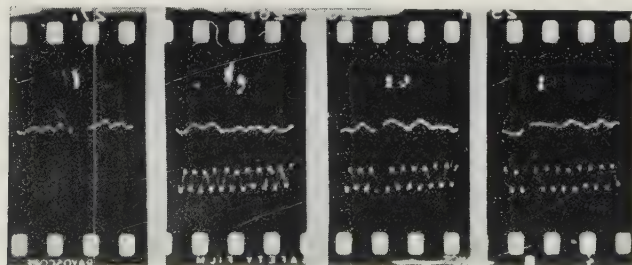
Photographies 15 à 21 : Visée sur la partie inférieure de la flamme.  
(Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)



15

16

17



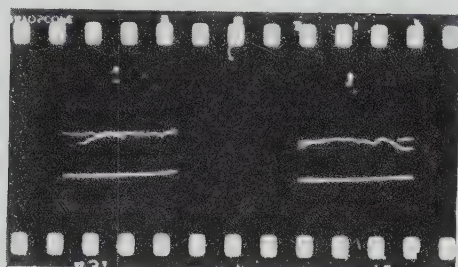
18

19

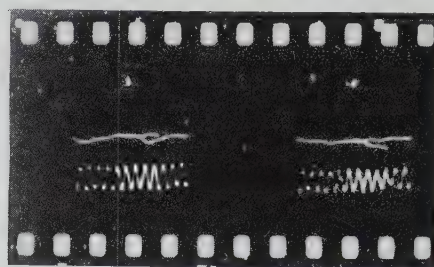
20

21

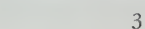
Température à 3,30 m du brûleur.



1



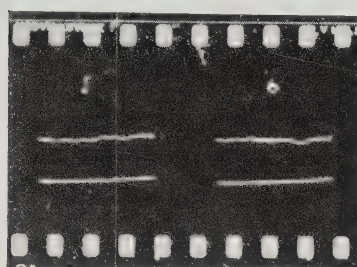
2



3

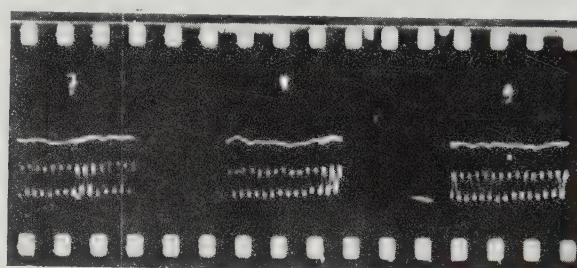
4

Photographies 1 à 4 : Visée sur la partie supérieure de la flamme. (Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)



5

6

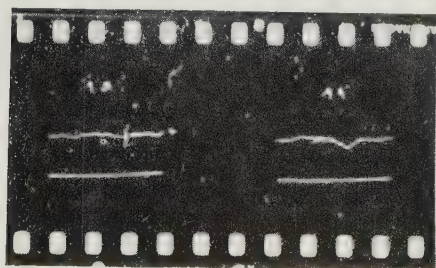


7

8

9

Photographies 5 à 9 : Visée sur le milieu de la flamme. (Sinusoïde de 50 pér./sec.)



10



11



12

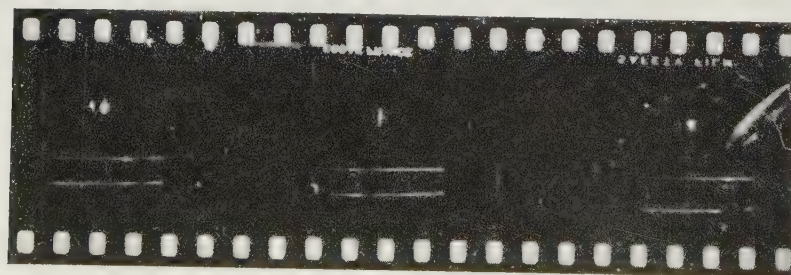


13

14

15

Photographies 10 à 15 : Visée sur le bas de la flamme (Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)



16

17

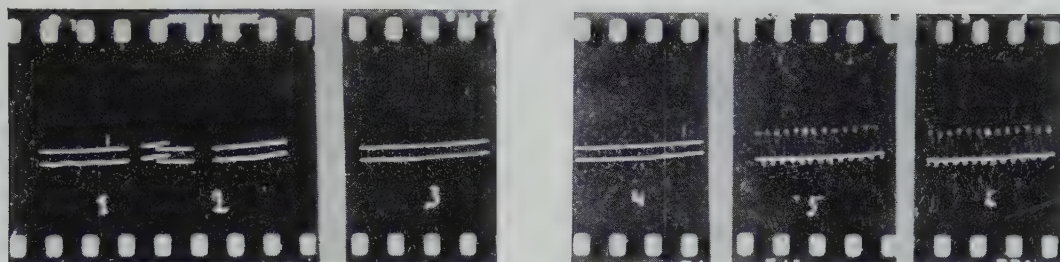
18

Température de la sole.

Photographies 16 à 18 : Visée sur la sole à 2,30 m. du brûleur.

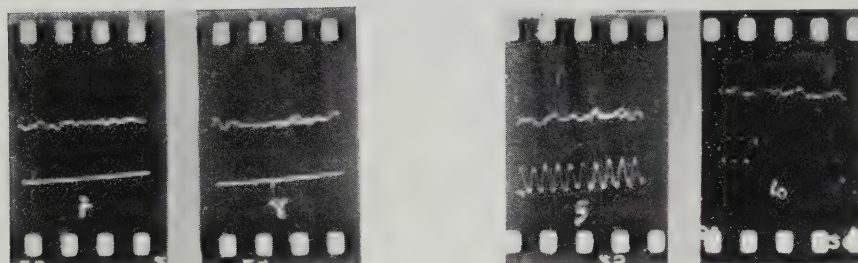
## Expérience II.

### Température de la sole.

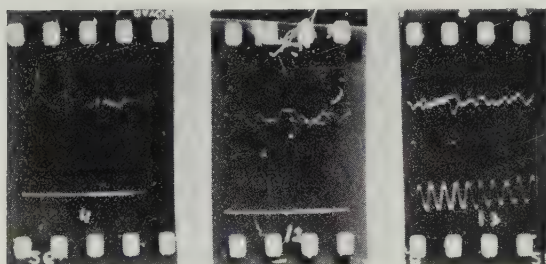


Photographies 1 à 6 : Visée sur la sole, le long du mur nord du four à 1,50 m du brûleur.  
(Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)

### Température de la flamme à 30 cm du brûleur.



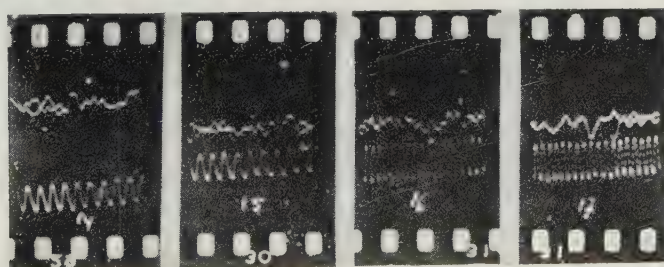
Photographies 7 à 10 : Visée sur la flamme à la sortie du brûleur (Sinusoïde de référence à 100 pér./sec.)



Photographies 11 à 13 : Même visée que précédemment, mais l'appareil est muni d'un filtre bleu de Iéna BG12.

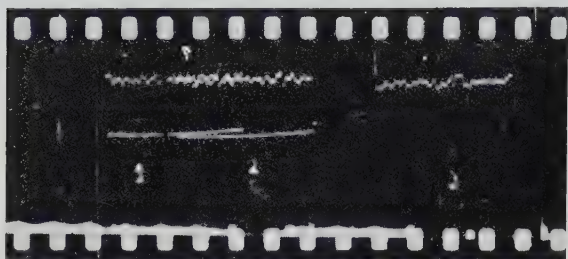
Sinusoïde de référence :

- à 100 pér./sec. pour les photographies 13, 14, 15 ;
- à 200 pér./sec. pour les photographies 16 et 17.



Photographies 14 à 17 : Même visée que précédemment, mais l'appareil est muni d'un filtre bleu de Iéna BG12.

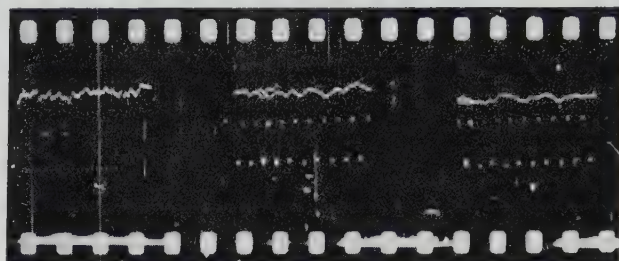
### Expérience III



1

2

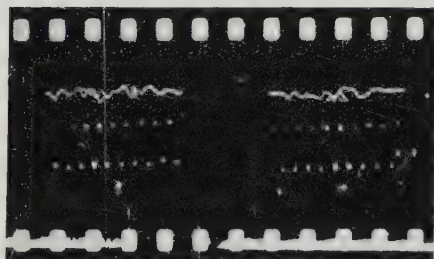
3



4

5

6



7

8

#### Température de la flamme à 30 cm du brûleur.

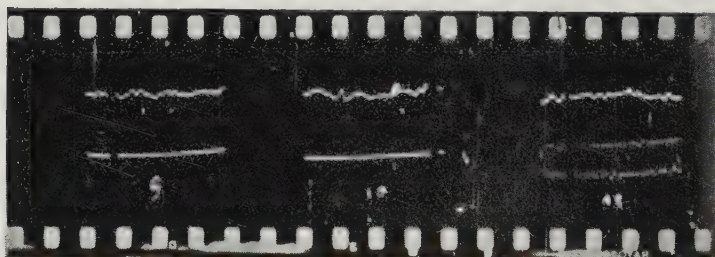
*Photographies 1 à 6 : Visée sur le centre de la flamme (Sinusoïde de référence à 100 pér./sec.)*

*Photographies 7 et 8 : Visée sur le haut de la flamme (Sinusoïde de référence à 100 pér./sec.)*

#### Température de la flamme à 2,60 m du brûleur.

*Photographies 9 à 14 : Visée sur le centre de la flamme.*

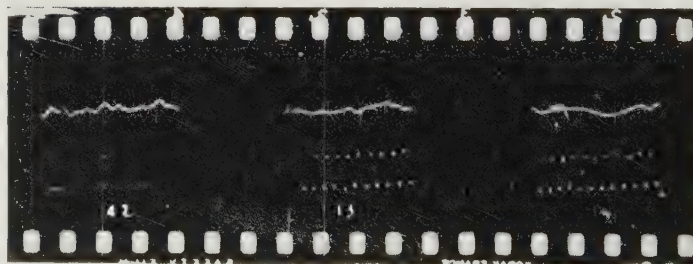
*(Sinusoïde de référence à 100 pér./sec.)*



9

10

11



12

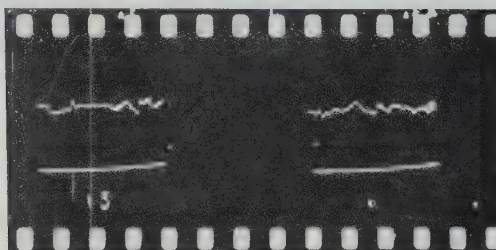
13

14

### Expérience III

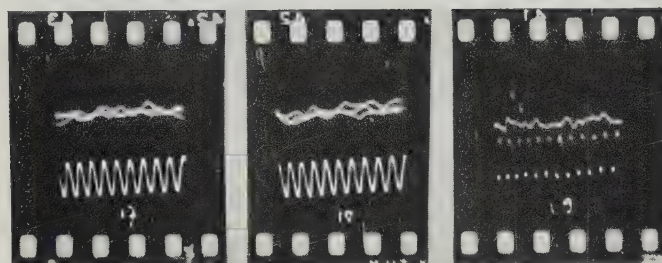
*Suite*

Température de la flamme  
à 1,80 m du brûleur.



15

16



17

18

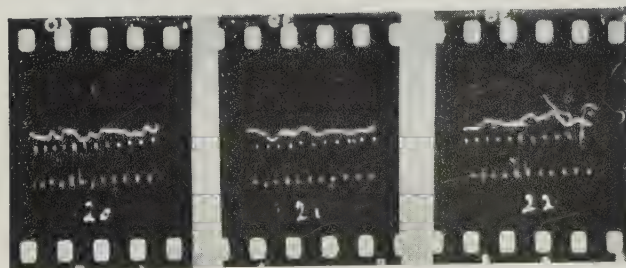
19

*Photographies 15 à 22 :*

Visée sur le centre de la flamme.

Sinusoïde de référence à

- 100 pér./sec. pour les photographies 17, 18, 21, 22 ;
- 50 pér./sec. pour les photographies 19 et 20.



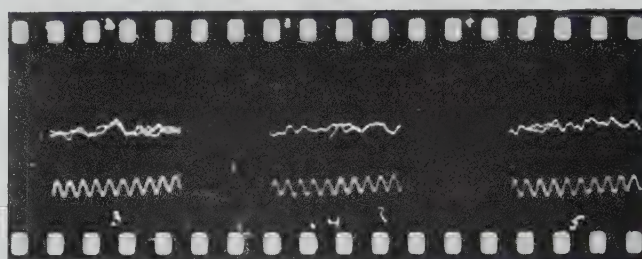
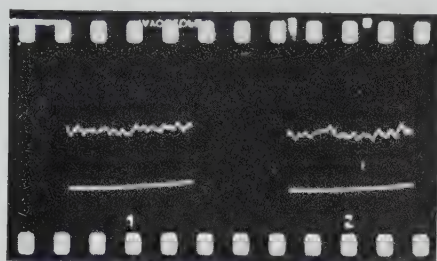
20

21

22

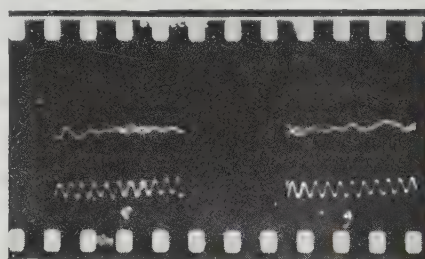
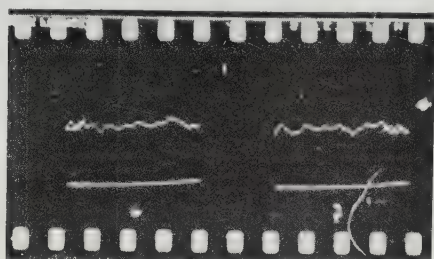
# *Expérience IV*

Température de la flamme à 30 cm du brûleur.



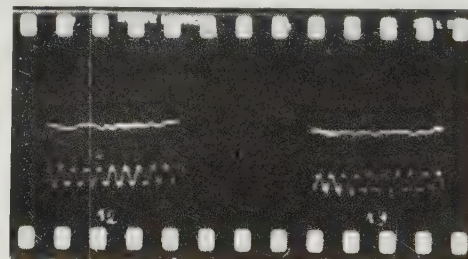
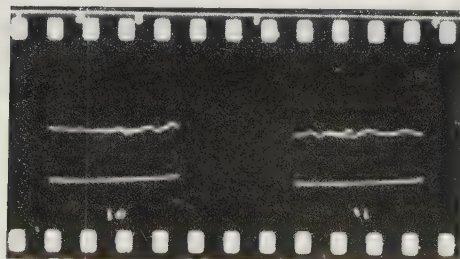
1 2 3 4 5  
Photographies 1 à 5 : Visée sur le centre de la flamme. (Sinusoïde de référence à 100 pér./sec.)

Température de la flamme à 1,80 m du brûleur.



6 7 8 9  
Photographies 6 à 9 : Visée sur le centre de la flamme. (Sinusoïde de référence à 100 pér./sec.)

Température de la flamme à 2,60 m du brûleur.



10

11

12

13



Photographies 10 à 13 : Visée sur le centre de la flamme. (Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)

Photographies 16 et 17 : Même visée, mais l'appareil est muni d'un filtre bleu d'Iéna BG-12. (Sinusoïde de référence à 50 pér./sec.)

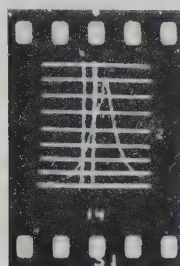
16

17

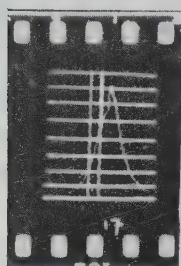
ANNEXE II

Groupe n° 1. — VARIABLE : LA PRESSION DE SURALIMENTATION.

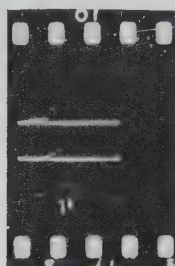
Pression de suralimentation : 100 g/cm<sup>2</sup>.



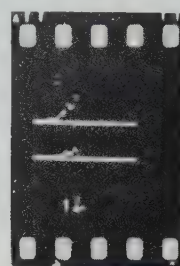
1



2



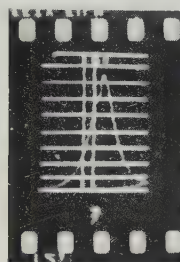
3



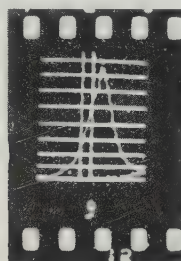
4

Photographies 1 et 2 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 40 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 3 et 4 : relevé des températures.

Pression de suralimentation : 200 g/cm<sup>2</sup>.



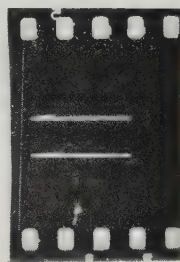
5



6



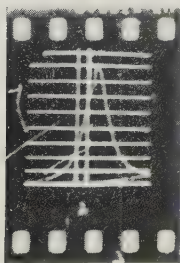
7



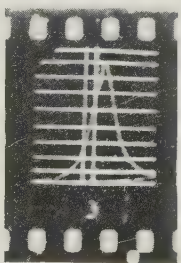
8

Photographies 5 et 6 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 45 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 7 et 8 : relevé des températures.

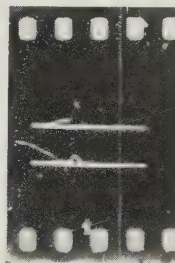
Pression de suralimentation : 300 g/cm<sup>2</sup>.



9



10



11

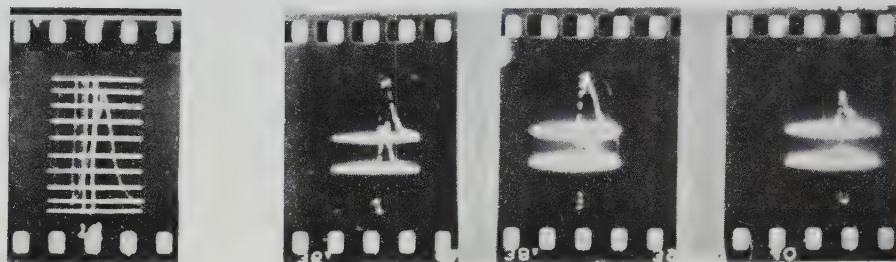


12

Photographies 9 et 10 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 45 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 11 et 12 : relevé des températures.

Groupe n° 2. — VARIABLE : LA RICHESSE.

Richesse : 0,34



13

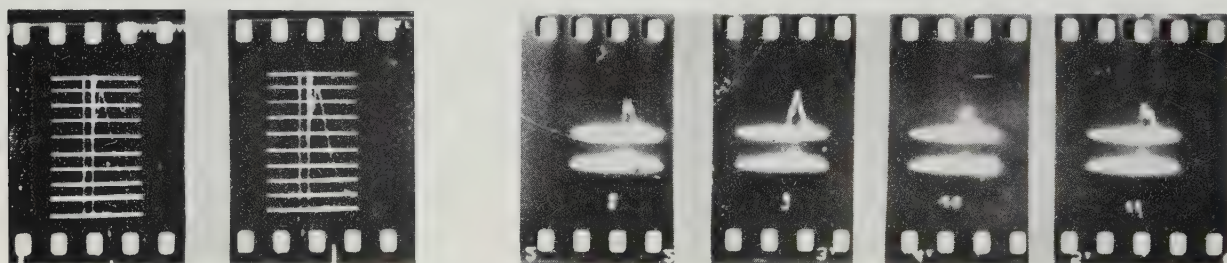
14

15

16

Photographie 13 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 45 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 14 à 16 : relevé des températures.

Richesse : 0,41



17

18

19

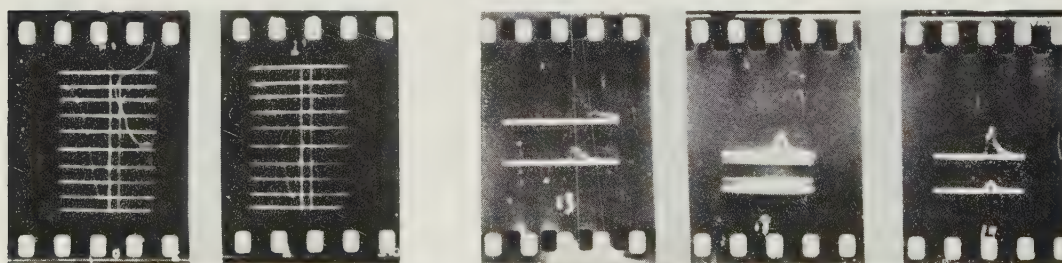
20

21

22

Photographies 17 et 18 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 45 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 19 à 22 : relevé des températures.

Richesse : 0,485



23

24

25

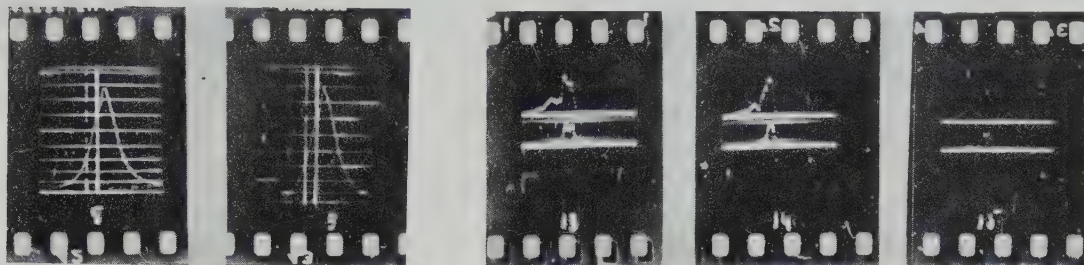
26

27

Photographies 23 et 24 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 45 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 25 à 27 : relevé des températures.

Groupe n° 3. — VARIABLE : L'AVANCE À L'INJECTION.

Avance à l'injection : 12,5°.



28

29

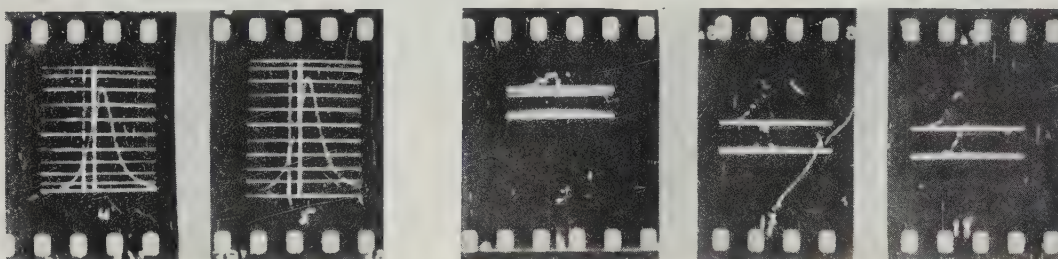
30

31

32

Photographies 28 et 29 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 45 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 30 à 32 : relevé des températures.

Avance à l'injection : 15°.



33

34

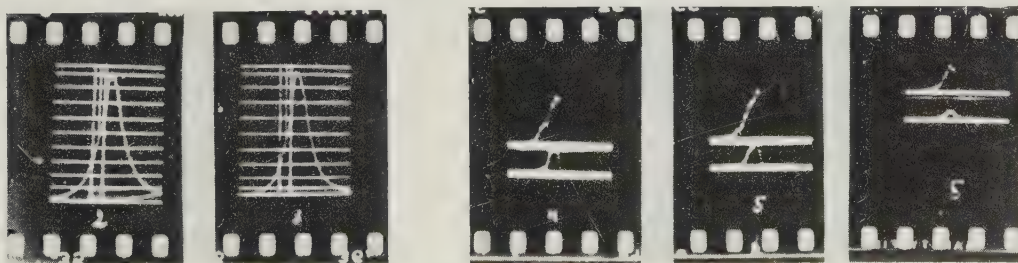
35

36

37

Photographies 33 et 34 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 50 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 35 à 37 : relevé des températures.

Avance à l'injection : 20°.



38

39

40

41

42

Photographies 38 et 39 : relevé des pressions. L'étalonnage a eu lieu de 5 en 5 kg/cm<sup>2</sup> entre 0 et 50 kg/cm<sup>2</sup>.  
Photographies 40 à 42 : relevé des températures.

## BIBLIOGRAPHIE

1. ANGSTRÖM. — Beobachtungen über die Durchstrahlung von Wärme verschiedener Wellenlänge durch trübe Medien. *Ann. d. Phys.*, 36 (1889), 715-724.
2. P. BARRET. — La mesure des températures de flammes. *Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air*. Note technique, n° 33, 1950.
3. E. BAUER. — Recherches sur le Rayonnement. *Annales de Chimie et de Physique*, 8<sup>e</sup> série, t. 29, 1913, 2<sup>e</sup> partie, p. 402 et suivantes.
4. G. BECK et Ch. ERICHSEN. — Spektraluntersuchungen des Verbrennungsvorganges. *V. D. I. Forschungsheft*, 377, mars-avril 1936, p. 975 et 976.
5. A. BECKER. — Ueber die Strahlung und Temperatur der Hefner Lampe. *Ann. d. Physik*, 28, (1909), 1017-31.
6. A. BLANC-LAPIERRE et M. PERROT. — (1) Caractéristique courant-tension des films d'argent très minces pour des valeurs élevées du champ électrique. *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 230, n° 19, p. 1641.  
— (2) Sur certaines propriétés détectrices présentées par des lames minces d'argent. *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 230, n° 20, p. 1749.
7. G. CALINGAERT, S. D. HÉRON et R. STAIR. — *S. A. E. Journal*, nov. 1936.
8. A. COLOMBANI et G. RANC. — (1) Sur la cristallisation des couches très minces d'or. *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 232, n° 14, p. 1344.  
— (2) Influence du support sur la cristallisation des couches très minces d'or. *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 233, n° 1, p. 46.
9. COMITÉ INTERNATIONAL D'ÉTUDES DU RAYONNEMENT DES FLAMMES. — (1) Travaux de MM. LÉVÊQUE et LÉVY, rapport D<sub>2</sub>/f/2-ah, janv. 1954.  
— (2) *Chaleur et Industrie*, n° 308, mars 1951.
10. M. DONCESCU. — Détermination des températures de gaz pendant la détente dans les moteurs à explosion. *Publications Scientifiques et Techniques du Ministère de l'Air*, n° 69, 1935.
11. Ch. DUFOUR. — Recherches sur la luminosité, le contraste et la résolution de systèmes interférentiels à ondes multiples. Utilisation de couches minces complexes. *Annales de Phys.*, t. VI, janv.-fév. 1951.
12. A. FÉRY. — Étude des propriétés électriques des couches minces de platine obtenues par pulvérisation cathodique. *Annales de Physique*, mai-juin 1933.
13. J. GALEY. — Mesure des températures de brillance, des facteurs monochromatiques d'émission et des températures vraies des flammes par photométrie photographique. *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 233, n° 10, p. 575.
14. A. G. GAYDON et H. G. WOLFHARD. — Spectroscopic studies of low pressure flames. Evidence for abnormally high electronic excitation. *Proceeding of the Royal Society*, série A, vol. 205, n° 1080 (22 janv. 1951).
15. A. G. GAYDON et H. G. WOLFHARD. — L'excitation du spectre de OH dans les flammes sous basse pression. *Revue I. F. P.*, vol. IV, n° 8 (1949).
16. H. GRAFF. — Mesure des températures de gaz dans les moteurs à combustion interne. *V. D. I.*, 26 juillet 1942.
17. H. C. HOTTEL et P. F. BROUGHTON. — Determination of true temperature and total radiation from luminous gas flames. *Industrial and Engineering Chemistry*. Analytical édition, vol. IV, 1932, p. 166-175.
18. K. KARDE. — Beitrag zum Verbrennungsvorgang in der Dieselmachine. *A. T. Z.*, Heft 20, 25 oct. 1936.
19. KENNELLY, WRIGHT et BYLEVELT. — The convection of heat from small copper wires. *Trans. Amer. Inst. El. Eng.*, 28 (1909), I, 363.
20. E. W. LANDEN. — Combustion studies of the Diesel engine. *S. A. E. Journal*, vol. 54, n° 6, juin 1946.
21. E. W. LANDEN. — *Glass Industry*, vol. 24, janv. 1943.
22. E. W. LANDEN et L. A. BLANC. — Instrumentation in the study of Diesel combustion. *Trans. of the A. S. M. E.*, fév. 1943, p. 121-125.
23. P. S. MYERS et O. A. UYEHARA. — Flame Temperature Measurements : Electronic solution of the temperature equations. *S. A. E. Quaterly Trans.*, vol. 1, n° 4, (oct. 1947), p. 592-601.
24. K. NEUMANN. — Influence de la vitesse de combustion sur le cycle. *Forsch.*, n° 4, juillet 1939.
25. H. PFRIEM. — La mesure des températures rapidement variables dans les moteurs. *A. T. Z.*, juillet 1940.
26. G. RIBAUD. — Traité de pyrométrie optique. *Éditions de la Revue d'optique théorique et instrumentale* (1931).  
G. RIBAUD et E. BRUN. — Le Rayonnement Thermique. *Sennac*, édit. 1948.
27. G. RIBAUD. — Conférences d'actualités scientifiques et industrielles. *Conservatoire National des A. et M.*, 1930. (Hermann, éditeur).
28. G. RIBAUD et E. BRUN. — La convection forcée de la chaleur. Fluide s'écoulant normalement à un cylindre. *Memorial des Sciences Physiques*, fascicule L, 1948.
29. A. SCHACK. — Ueber die Strahlung der Feuer-gase und ihre praktische Berechnung. *Zeitsch. f. tech. Physik*, 1924, n° 6, 267-278.
30. A. SCHACK. — Strahlung von leuchtenden Flammen. *Zeitsch. f. techn. Physik*, 1925, n° 10, p. 530.
- 30 bis. W. SCHROEDER. — Étude photothermomé-trique de la flamme dans les moteurs Diesel. *Motortechn. Z.*, t. 1, 1939, p. 181-190.
31. T. M. SUGDEN et B. A. THRUSH. — A cavity resonator method for electron concentra-tion in flames. *Nature*, n° 4277, 20 oct. 1951, p. 703.
32. L. THALER et R. VICHNIEVSKY. — Enregis-trement du phénomène relevé sur l'écran des tubes cathodiques. *Revue I. F. P.*, vol. II, n° 8-9, p. 449 et suivantes.
33. L. THALER, R. VICHNIEVSKY et E. BRODERS. — Manographes stroboscopiques. *Revue I. F. P.*, vol. II, n° 8-9, p. 478 et suivantes.
34. O. A. UYEHARA et P. S. MYERS. — Diesel combustion temperatures. Influence of fuels of selected composition. *S. A. E. Quarterly Trans.*, vol. 3 n° 1, (janv. 1949), p. 178-199.

33. O. A. UYEHARA, P. S. MYERS, K. M. WATSON, L. A. WILSON. — (1) Flame Temperature Measurements in internal-combustion engines. *A. S. M. E. Trans.*, vol. 68, janv. 1946, p. 17-30.  
— (2) Diesel combustion temperatures. The influence of operating variables. *A. S. M. E. Trans.*, juillet 1947, p. 465-477.
36. R. VICHNIEVSKY et B. SALÉ. — Diagrammes semi-logarithmiques entropie-volume (S-log V) pour l'interprétation des résultats d'expériences. *Rev. I. F. P.*, vol. 3, n° 12, déc. 1948.
37. R. VICHNIEVSKY et G. MONNOT. — Réflexions sur la combustion des hydrocarbures pulvérisés. *Comptes rendus Ac. Sc.*, t. 230, n° 24.
38. L. WITHROW et G. RASSWEILER. — *Industrial and Eng. Chemistry*, juillet 1931 et mai 1932.
39. U. YOSIDA. — Au sujet du procédé d'inversion des raies du spectre pour déterminer la température dans un moteur à essence. *Report of the Aeronautical Research Institute, Tokio Imperial University*, t. 14, 1939, n° 177, p. 139-209.

## DEUXIÈME THÈSE

---

L'utilisation des traceurs radio-actifs dans la recherche appliquée.

---

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 8 Juin 1952

*Pour le Doyen de la Faculté des Sciences,*

*L'assesseur,*

ROBERT LÉVY

VU ET PERMIS D'IMPRIMER :

*Pour le Recteur de l'Académie de Paris,*

*Le Vice-Président du Conseil de l'Université,*

J. DAVY



